



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Caracterización del hormigón estructural con propiedades de captación de CO₂

Trabajo realizado por:

Arnau Enciso Rius

Dirigido por:

**Albert de la Fuente Antequera e Ignacio Segura
Perez**

Grado en:

Ingeniería de Obra Públicas

Barcelona, **septiembre del 2017**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TREBAJO FINAL DE GRAO

RESUMEN

El presente trabajo analiza la problemática producida por la industria cementera, en donde para la producción del cemento se producen emisiones de efecto invernadero, en especial de CO₂. En primer lugar, se expone la relación en el impacto generado por dicha industria creciente y la posibilidad de disminuirlo.

La industria cementera es la industria que más emisiones efecto invernadero produce, debido a la calcinación de la piedra natural y el calentamiento de los hornos. Aquí hay que sumarle, los altos valores de emisiones de gases de efecto invernadero, que son añadidos miles de toneladas de hormigón residual generado tanto en la construcción, como lógicamente provenientes de la demolición. Este residuo se está acopiando en los vertederos sin encontrarle un uso potencial ni ningún tipo de eliminación.

El daño generado por la industria cementera ha supuesto un crecimiento de la inquietud a poder mitigar este impacto. En este trabajo tiene el objetivo de contribuir a hallar una solución para que esta industria sea más ecológica. Para ello, mediante la carbonatación de hormigón residual, se ha demostrado la posibilidad de utilizar como sumidero de CO₂ el residuo de hormigón que tenía que destinarse al vertedero. Con este proyecto se pretende demostrar la posibilidad de capturar CO₂ con material cementicio. Para ello, se diseña un filtro para capturar el dióxido de carbono mediante hormigón residual molido.

Para desarrollar esta investigación se ha elegido hormigón residual procedente de la industria de los prefabricados. Este sector trabaja con hormigón tipo CEM I, los cuales contienen una mayor cantidad de cemento en la mezcla, comparado a los otros tipos, y tienden a ser mezclas secas. Este hecho hace aumentar la posibilidad de contener mayor cantidad de cemento sin hidratar. El trabajo se centra también en la relación entre superficie de grano respecto la cantidad que absorbe, para así encontrar la granulometría más óptima para obtener los valores más altos de absorción. También se ha añadido como material de ensayo de la campaña experimental, residuo en polvo de hormigón procedente del corte de piezas de hormigón, residuo común en procesos de fabricación del sector cementicio.

ABSTRACT

This TFG paper analyzes the problems produced by the cement industry, where for the production of cement, greenhouse effect emissions are produced, especially CO₂. Firstly, it sets out the relationship between the impact of this growing industry and the possibility of reducing it.

The cement industry is the industry that produces the most greenhouse gas emissions, due to the calcination of natural stone and the heating of kilns. Moreover, it is needed to consider the high greenhouse gas emission values, which add up to thousands of tons of residual concrete generated both in construction and, logically, from demolition. This waste is being collected in landfills without any potential use or disposal.

The damage caused by the cement industry has led to an increase in the concern that this impact could be mitigated. This TFG paper aims to help find a solution to make this industry greener. To this end, the carbonation of residual concrete has demonstrated the possibility of using the concrete waste that had to be disposed of in the landfill as a CO₂ sink. This project aims to demonstrate the possibility of capturing CO₂ with cementitious material. A filter is designed to capture carbon dioxide by means of crushed residual concrete.

To carry out this research, it has been chosen the residual concrete from the precast industry. This sector works with CEM I type concrete, which contain a greater amount of cement in the mix, compared to other types, and tend to be dry mixes. This fact increases the possibility of containing more cement without hydration. The work also focuses on the ratio of grain surface area to the amount that it absorbs, in order to find the most optimal particle size to obtain the highest absorption values. It has also been added as a test material for the experimental campaign, concrete dust residue from the cutting of concrete pieces, a common residue in manufacturing processes in the cement sector.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a los profesores Ignacio Segura y Albert de la Fuente por ser mis tutores de la tesina y por su dedicación y paciencia prestado durante los meses de trabajo. También agradecerles que me hayan enseñado a realizar un documento científico de estas dimensiones. Agradecer también a Renen Pícolo, estudiante de postdoctorado, por su colaboración en la estructuración de la campaña experimental.

También dar gracias por la ayuda y colaboración prestada durante la campaña experimental por los equipos del Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló y del Laboratorio de Materiales de la facultad de Caminos de la UPC. Agradecer la ayuda a Marc Tous responsable del Laboratorio de Materiales de la facultad de la Edificación de la UPC, que con su ayuda y maquinaria se pudo realizar la parte final de la campaña experimental.

Agradecimientos a todos los amigos que me han ayudado y apoyado en los momentos difíciles del trabajo. Por último y no menos importante, muchas gracias a mi familia por apoyo moral que me han dado.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2.OBJETIVO	2
1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	3
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE.	5
2.1. INTRODUCCIÓN	5
2.2. EMISIONES DE CO ₂	6
2.2.1. Efecto invernadero	8
2.3. GENERACIÓN DE RESIDUOS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN	9
2.3.1. Emisiones de gases	9
2.3.2. Emisiones sólidas	11
2.4. REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS	12
2.4.1. Reutilización de hormigón para la fabricación del cemento	12
2.4.2. Reutilización de hormigón para la fabricación del hormigón	13
2.5. CAPTACIÓN DE CO ₂	14
2.5.1. Baldosas absorbentes de CO ₂	14
2.5.2. Entramado de metal orgánico secuestrador de CO ₂	15
2.5.3. Fachadas biológicas	15
2.6. CONCLUSIONES	16
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1. INTRODUCCIÓN	18
3.2. METODOLOGÍA	18
3.2.1 Materiales utilizados	19
3.3. FASE 1 . PREPARACIÓN DEL MATERIAL Y CARACTERIZACIÓN QUÍMICA	19
3.3.1. Difracción de rayos X (DRX)	21
3.3.2. Análisis termogravimétrico (TGA)	23
3.3.3. Absorción	24
3.4. FASE 2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL Y CARACTERIZACIÓN QUÍMICA FINAL	25
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	28
4.1. INTRODUCCIÓN	28
4.2. RESULTADOS ENSAYO ABSORCIÓN	28
4.3. RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)	29
4.4. RESULTADOS TERMOGRAVIMETRÍA	31
4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	57

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	60
5.1. CONCLUSIONES	60
5.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	61
 CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.....	 63

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1 Curva termogravimétrica de la muestra de polvo de corte antes de ser expuesta al CO ₂	32
Gráfica 4.2 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra de polvo de corte antes de ser expuesta al CO ₂	32
Gráfica 4.3 Curva termogravimétrica de la muestra de polvo de corte después de ser expuesta al CO ₂	33
Gráfica 4. 4 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra de polvo de corte después de ser expuesta al CO ₂	33
Gráfica 4.5 Curva termogravimétrica de la muestra T1.<1 antes de ser expuesta al CO ₂	34
Gráfica 4.6 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.<1 antes de ser expuesta al CO ₂	34
Gráfica 4.7 Curva termogravimétrica de la muestra T1.<1 después de ser expuesta al CO ₂	35
Gráfica 4.8 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.<1 después de ser expuesta al CO ₂	35
Gráfica 4.9 Curva termogravimétrica de la muestra T1.1 antes de ser expuesta al CO ₂	36
Gráfica 4.10 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.1 antes de ser expuesta al CO ₂	36
Gráfica 4.11 Curva termogravimétrica de la muestra T1.1 después de ser expuesta al CO ₂	37
Gráfica 4.12 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.1 después de ser expuesta al CO ₂	37
Gráfica 4.13 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.4 antes de ser expuesta al CO ₂	38
Gráfica 4.14 Curva termogravimétrica de la muestra T1.4 antes de ser expuesta al CO ₂	38
Gráfica 4.15 Curva termogravimétrica de la muestra T1.4 después de ser expuesta al CO ₂	39
Gráfica 4.16 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.4 después de ser expuesta al CO ₂	39
Gráfica 4.17 Curva termogravimétrica de la muestra de granulometría 6.3 mm antes de ser expuesta al CO ₂	40
Gráfica 4.18 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra de granulometría 6.3 mm antes de ser expuesta al CO ₂	40
Gráfica 4.19 Curva termogravimétrica de la muestra de granulometría 6.3 mm después de ser expuesta al CO ₂	41
Gráfica 4.20 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra de granulometría 6.3 mm antes de ser expuesta al CO ₂	41
Gráfica 4.21 Curva termogravimétrica de la muestra T1.8 antes de ser expuesta al CO ₂	42
Gráfica 4.22 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.8 antes de ser expuesta al CO ₂	42
Gráfica 4.23 Curva termogravimétrica de la muestra T1.8 después de ser expuesta al CO ₂	43
Gráfica 4.24 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.8 después de ser expuesta al CO ₂	43
Gráfica 4.25 Curva termogravimétrica de la muestra T2.<1 antes de ser expuesta al CO ₂	44

Gráfica 4.26 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.<1 antes de ser expuesta al CO ₂	44
Gráfica 4.27 Curva termogravimétrica de la muestra T2.<1 después de ser expuesta al CO ₂	45
Gráfica 4.28 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.<1 después de ser expuesta al CO ₂	45
Gráfica 4.29 Curva termogravimétrica de la muestra T2.1 antes de ser expuesta al CO ₂	46
Gráfica 4.30 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.1 antes de ser expuesta al CO ₂	46
Gráfica 4.31 Curva termogravimétrica de la muestra T2.1 después de ser expuesta al CO ₂	47
Gráfica 4.32 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.1 después de ser expuesta al CO ₂	47
Gráfica 4.33 Curva termogravimétrica de la muestra T2.4 antes de ser expuesta al CO ₂	48
Gráfica 4.34 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.4 antes de ser expuesta al CO ₂	48
Gráfica 4.35 Curva termogravimétrica de la muestra T2.4 después de ser expuesta al CO ₂	49
Gráfica 4.36 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.4 después de ser expuesta al CO ₂	49
Gráfica 4.37 Curva termogravimétrica de la muestra T2.6,3 antes de ser expuesta al CO ₂	50
Gráfica 4.38 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.6,3 antes de ser expuesta al CO ₂	50
Gráfica 4.39 Curva termogravimétrica de la muestra T2.6,3 después de ser expuesta al CO ₂ ...	51
Gráfica 4.40 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.6,3 después de ser expuesta al CO ₂	51
Gráfica 4.41 Curva termogravimétrica de la muestra T2.8 antes de ser expuesta al CO ₂	52
Gráfica 4.42 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.8 antes de ser expuesta al CO ₂	52
Gráfica 4.43 Curva termogravimétrica de la muestra T2.8 después de ser expuesta al CO ₂	53
Gráfica 4.44 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.8 después de ser expuesta al CO ₂	53
Gráfica 4.45 Gráfica comparativa de la portlandita inicial-final	56
Gráfica 4.46 Gráfica comparativa de carbonato de calcio inicial-final.....	57
Gráfica 4.47 Calcita producida respecto al CO ₂ absorbido.....	58
Gráfica 4.48 Porcentaje en masa de CO ₂ absorbido.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Emisiones mundiales de CO ₂ en kT. (División de Ciencias Ambientales del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, Tennessee, USA).....	6
Figura 2.2. Efecto invernadero	8
Figura 2. 3 Baldosas producidas por la empresa GeoSilex.....	15
Figura 3.1. Separación mediante tamices del hormigón	20
Figura 3.2 Material separado por granulometrías	21
Figura 3.3 Bandeja con material molido por los anillos metálicos.....	22
Figura 3.4 Molino de anillos metálicos.....	22
Figura 3.5. Muestras preparadas para DRX.....	22
Figura 3.6 Fórmula para el cálculo de la absorción de las muestras.....	24
Figura 3.7 Muestras sumergidas en agua	25
Figura 3.8 Autoclave para carbonatación con atmosfera controlada de 100% CO ₂	26
Figura 3.9 Muestras en el interior de la autoclave	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Emisiones de gases de efecto invernadero de la UE (fuente EEA)	7
Tabla 2.2 Producción mundial de cemento (www.statista.com)	10
Tabla 2.3 . Composición mineralógica obtenida en el estudio de los profesores Nele de Belie et al. 2015	13
Tabla 2.4 Ensayo a compresión de mezclas con AN y AR (Ajdukiewicz, 2002)	14
Tabla 4.1 Absorción de las muestras de ensayo y cálculo del agua necesaria para carbonatación	29
Tabla 4. 2 Evaluación difractogramas	30
Tabla 4.3 Pérdidas de agua y cálculo de portlandita antes de la carbonatación	54
Tabla 4 4 Pérdidas de CO ₂ y cálculo del carbonato de calcio antes de la carbonatación	55
Tabla 4.5 Pérdidas de agua y cálculo de portlandita después de la carbonatación	55
Tabla 4.6 Pérdidas de CO ₂ y cálculo del carbonato de calcio después de la carbonatación.....	56
Tabla 4.7 Moles reaccionados de portlandita y otras fases hidratados respecto los moles de calcita formados	59
Tabla 4.8 Absorciones de CO ₂ por 100g de muestra.....	59
Tabla 4.8 Cantidades de absorción de CO ₂ por kilo de hormigón.....	60

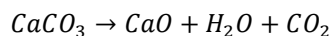
CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

El material más utilizado en la construcción en todo el mundo es el cemento. La razón radica en su bajo coste y sus buenas prestaciones de durabilidad. Cada año se fabrican billones de toneladas alrededor de la tierra, emitiendo grandes cantidades de gases nocivos, como por ejemplo el CO₂, siendo éste el principal gas invernadero y del cambio climático. Hoy en día, las emisiones siguen aumentando, provocando un aumento en la inquietud social sobre el calentamiento global. Por esta razón, resulta importante hallar soluciones para reducir el dióxido de carbono emitido durante la fabricación, principalmente porque la demanda de cemento sigue creciendo, a causa del continuo crecimiento urbano y de la construcción de nuevas infraestructuras.

La materia prima para la producción de cemento está formada, principalmente, de piedra caliza, a la que se añade argila, arena y óxido de hierro. Se mezclan las materias primas para ser trituradas y molidas hasta dejarlo polvo. El proceso de calcinación se inicia en un precalentador que empieza a templar con aire el material triturado, conocido como Clinker. Posteriormente, entra dentro de un horno rotatorio, el cual irá amplificando por fases la temperatura hasta llegar alrededor de los 1500°C. Estas altas temperaturas descarbonatan la piedra caliza (CaCO₃) para obtener el calcio (CaO) y eliminar el carbono. En consecuencia, se emitirá gran cantidad de CO₂. Finalmente, el Clinker es enfriado a base de aire, y el exceso de calor es redirigido a la fase de precalentamiento inicial. El producto final es el cemento Portland, un polvo muy fino del orden de 10 micras, se conforma de mezclar el Clinker con yeso, que actúa como retardante, y algún otro aditivo.



Reacción de descarbonatación de la piedra caliza

Por cada tonelada de cemento que se está produciendo de media se emiten alrededor de 850 kg de CO₂ (CE, 2010). Por este motivo, durante los últimos años, se está optimizando el proceso para reducir estas ratios de emisiones, por ejemplo, mejorando la eficiencia térmica del horno, el cual es un punto importante del proceso de producción del cemento. Aparte de la energía para triturar las rocas y los diferentes áridos, es necesario someter a estos productos una temperatura de 1500°C. Para ello es necesario alrededor de 100 kwh por tonelada producida de cemento y aproximadamente 100 kg de combustible (OECD, 2001). Las eléctricas están subiendo cada día más el precio de la energía, ya que resulta más cara producirla y aún las energías renovables se encuentran en una fase muy inicial. Por otro lado, para poder sustituir el combustible con el que eliminar o reducir las emisiones de CO₂, actualmente se dispone solamente de biomasa como combustible concordante a las características de los fósiles. La demanda que generaría la industria cementera sería demasiado alta para el gran volumen que se necesita, por lo que aún no parece ser una alternativa a los combustibles fósiles.

Con el fin de poder reducir el CO₂ producido en el proceso de la fabricación de cemento, en esta tesina se diseña un filtro de hormigón residual. A través de la carbonatación poder capturar parte del CO₂ proveniente de la calcinación de la piedra caliza, que equivale al 65 % del CO₂ que se forma. El 35 % restante de CO₂ proviene de la quema de combustible, para dotar de altas temperaturas al horno.

Un hormigón joven tiene una mayor proporción de Portlandita que aún está por reaccionar con el CO₂ y, a la vez, si se tiene una medida de grano correcta para optimizar la relación; superficie de grano y porosidad en el filtro, se puede obtener la máxima absorción de CO₂, y un mejor filtrado. La combinación de este método con otras técnicas ya existentes puede reducir notablemente las emisiones generadas anualmente por la industria cementera.

Finalmente, con esta tesina se pretende aportar un método sencillo capaz de disminuir el impacto ambiental de la industria cementera y proteger la capa de ozono de las emisiones de efecto invernadero. Dando una segunda vida al residuo de hormigón, se elimina producto destinado al vertedero. A la vez, se suma la posible reutilización del filtro saturado, substitutivo de materia prima para la fabricación de más cemento, así se mitiga el impacto ambiental generado por la canteras y emisiones de transporte de árido para el Clinker. Por lo que, la reducción del CO₂ en el proceso de producción, vendrá dada por la absorción de carbono del filtro y el conjunto acciones comportarán una disminución notable de las emisiones de CO₂ generado por tonelada de cemento.

1.2. OBJETIVO

El objetivo principal de esta tesina es poder absorber las emisiones de CO₂ generadas por la industria cementera a partir de residuos de la misma industria como pueden ser desechos de hormigones de prefabricación o polvo de pulido proveniente de tareas de corte de hormigón. La carbonatación del hormigón será la vía de captación del gas de efecto invernadero.

Finalmente, con una caracterización química del producto final más detallada sería posible estudiar la posibilidad de poder reciclarlo como materia prima en el proceso de fabricación del cemento y/o como substitutivo de parte del agregado para la producción de hormigón.

Dentro de este objetivo general se engloban los siguientes objetivos parciales.

1. Caracterizar de forma mineralógica las materias primas iniciales que contienen los diferentes residuos de hormigón.
2. Establecer una metodología para realizar las pruebas de filtraje con los diferentes filtros de residuo de hormigones.

3. Caracterizar de forma mineralógica las muestras expuestas al CO₂, así analizar la composición química final y analizar la absorción de carbono de los diferentes residuos de hormigón.

1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La tesina se ha dividido en 6 capítulos en los que se explica todo el procedimiento realizado, descritos de forma ordenada en el tiempo por tal de facilitar el seguimiento. A continuación, se hace una pequeña explicación de lo que contiene cada uno de los capítulos.

En el capítulo 2 se expone el estado del arte, con una breve introducción a la temática en relación al impacto generado por la industria cementera y la posibilidad de mitigarlo. Se realiza una revisión del estado actual de las emisiones de CO₂, centrándose en las producidas por la industria cementera. Seguidamente se exponen una revisión de diferentes estrategias ecológicas ya utilizadas y/o estudiadas a día de hoy para reducir el impacto ambiental generado por el sector cementero e intentar así, solucionar parte del problema del calentamiento global. Finalmente en este capítulo, se enumeran brevemente diferentes hormigones captadores de CO₂.

En el capítulo 3 se enumeran las actuaciones seguidas en la campaña experimental y el método para exponer el residuo de hormigón al CO₂, para luego analizar la captación del residuo. Además, se expone los ensayos realizados durante la campaña experimental para la caracterización química de los residuos y los equipos utilizados para ello.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos en la campaña experimental. Además de la evaluación de la capacidad de absorción comparando la composición química de los residuos iniciales con los de después de ser expuestos a una atmosfera total de CO₂.

Finalmente, en el capítulo 5 se agrupan las conclusiones obtenidas durante la realización de los ensayos y las extraídas del análisis de los resultados.

Adicionalmente se presenta un capítulo de bibliografía donde se recogen las diferentes fuentes consultadas, tanto las citadas explícitamente en el texto como las que han servido para mejorar la comprensión de los conceptos relacionados con la tesina.

CAPÍTULO 2.

ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expone el impacto ambiental actual generado por los residuos y las emisiones de la industria de la construcción. Concretamente, este capítulo se centra en estudiar los valores de los residuos generados por esta industria y las emisiones de CO₂ producidas durante la fabricación del cemento, siendo éste el principal gas causante del efecto invernadero que está acelerando el calentamiento global.

Existen diferentes estrategias aplicables en la fabricación del cemento que posibilitan una reducción notable del impacto ambiental. Si se promueve a la industria cementera a que se apliquen estas medidas, podrían reducirse notablemente las emisiones. Por ejemplo: la utilización de hormigón reciclado para la materia prima del *Clinker*, la captura de la materia volátil que se emite durante la fabricación del cemento, la utilización de hormigón reciclado para el agregado del hormigón o la sustitución de combustibles fósiles.

Además, si las técnicas descubiertas actualmente se complementan con un filtraje del aire, los valores de emisiones resultarían aún más bajos. De acuerdo con lo expuesto en las investigaciones relacionadas con la captación de CO₂ del cemento, se puede partir de la base que la carbonatación (proceso físico-químico) puede absorber el carbono. Hasta el día de hoy, nunca se ha intentado filtrar aire utilizando la carbonatación del hormigón, sí que se ha investigado curados en cajas herméticas a diferentes atmosferas, variando los porcentajes de CO₂, pero con finalidades de durabilidad y características mecánicas.

2.2. EMISIONES DE CO₂

En este apartado se analiza la evolución de las emisiones de CO₂ generado por el conjunto de las industrias mundiales. El análisis se centra especialmente desde 1990 año de referencia en el protocolo de Kioto. En este año ya existía la evidencia sobre el fenómeno del cambio climático generado por los gases de efecto invernadero, principalmente por el CO₂ que representa el 75% del total de las emisiones (OECD, 2001).

Las emisiones de CO₂ a nivel mundial han experimentado un gran crecimiento desde los años 70 hasta día de hoy, en la *gráfica 2.1* podemos ver la progresión y las diferentes etapas del crecimiento de este periodo. Durante los inicios de los años 70 las emisiones se incrementaron durante los primeros cinco años. En 1975, debido a la primera crisis energética, las emisiones se estabilizaron. Una vez superada la primera crisis energética, los valores de CO₂ volvieron a crecer hasta 1979, año en donde empieza una crisis económica mundial y el precio del barril de petróleo crece, por lo que hay una reducción notable de las emisiones durante cinco años. Entre los años 1984 y 1989, nuevamente se produce un importante aumento de emisiones, que se ve frenado debido a la descomposición y crisis del bloque soviético, que hasta los años 90 conlleva una reducción de las emisiones de la antigua Unión Soviética y Europa del este. Durante estos años las emisiones de la URSS decrecieron considerablemente, lo que produjo un mantenimiento estable de las emisiones mundiales. Sin embargo, a partir del 1996 se vuelve a producir un fuerte crecimiento, causado en buena parte por China y los países asiáticos vecinos.

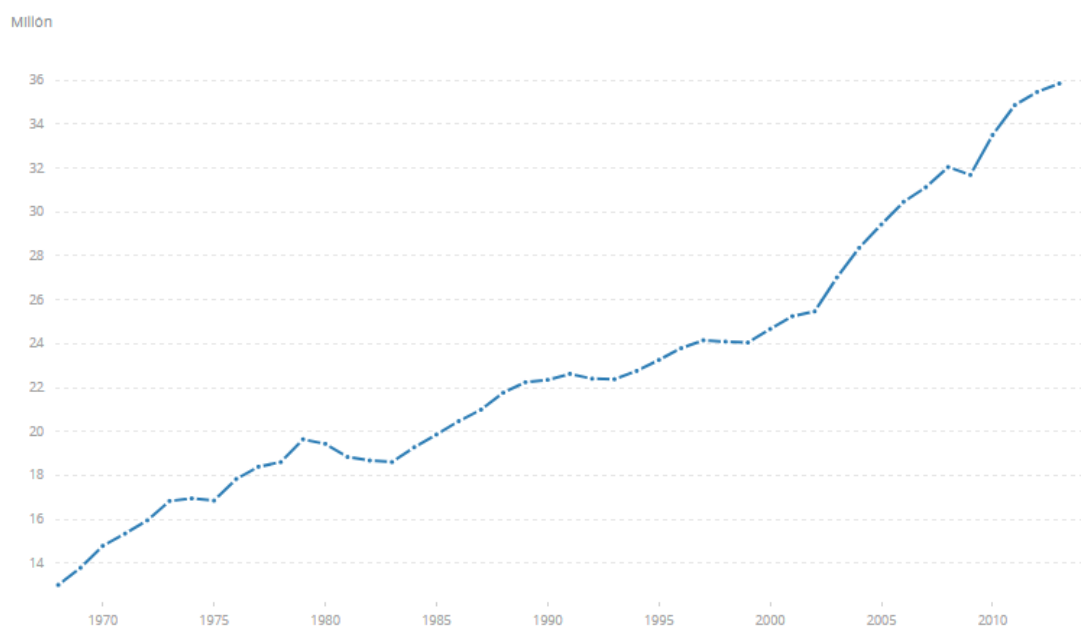


Figura 2.1 Emisiones mundiales de CO₂ en kT. (División de Ciencias Ambientales del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, Tennessee, USA).

En respuesta los primeros indicios claros del cambio climático que se estaba generando, a nivel internacional se ha materializado en dos instrumentos jurídicos, por un lado, la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, adoptada en 1992 y que entró en vigor en 1994, y, por otro, el Protocolo de Kyoto, que desarrolla y dota de contenido concreto las prescripciones genéricas de la Convención.

El Protocolo de Kyoto es un acuerdo internacional que se firmó en el año 1997 por 36 países industrializados. Este protocolo firmado en la ciudad japonesa tiene como objetivo proteger el medioambiente, esta protección del medio se basa en la reducción de las emisiones de efecto invernadero.

El objetivo del protocolo de Kioto es frenar este crecimiento continuo de emisiones, por lo que se pactó que durante los años 2008 y 2012 los valores de emisiones de efecto invernadero globales debían reducirse de media en un 5.2% en referencia a los valores del 1990. Esta disminución estipulada, es el resultado de los diferentes compromisos de reducción de emisiones pactado con los países firmantes, no obstante, los compromisos son diferentes en cada región, en el caso de la Unión Europea la reducción era de media del 8%, Estados Unidos del 7%, Japón del 6%, Rusia un 0% e incluso a algún país se le permitía un cierto aumento (Noruega con un aumento de emisiones del 1% o Islandia con un 10%). Este tratado entro en vigor el año 2005 y 184 países industrializados lo ratificaron.

Pasado el periodo comprometido entre los años 2008 y 2012, los valores de CO₂ emitidos durante el 2012 en la Unión Europea se redujeron un 11.85% respecto al 8% de reducción que se firmó en el protocolo de Kioto. Con esta reducción, la UE cumplió de sobras con su compromiso de disminución de emisiones. La reducción total a nivel de la Unión Europea fue positiva, pero no todos los países ejecutaron lo pactado en el protocolo, como se puede ver en la *Tabla 2.1* los países en rojo; Austria, Dinamarca, España Italia y Luxemburgo emitieron valores superiores a lo establecido. En el caso de España, el protocolo le permitía crecer respecto los números del 1990 en un 15% para finales del 2012, pero la realidad fue del 23.68% incrementando sus valores por encima del límite que marca Kioto. La realidad, es que España no aplicó suficientes estrategias reductoras de emisiones de efecto invernadero, gracias a la crisis sufrida a partir del 2007 los valores se estancaron y dejaron de crecer desmesuradamente, posiblemente si la crisis no hubiera desmoronado la industria los números serían mayores. Además, mediante los mecanismos de flexibilidad que contempla el protocolo de Kioto, España invirtió 800 millones de euros (EEA, 2014) durante este periodo para la compra derechos de emisión, principalmente a países de la Europa del este, para así poder reducir ligeramente los valores oficiales para el protocolo.

	EMISIONES EN 1990 AÑO DE REFERENCIA (MILLONES DE TONELADAS)	EMISIONES EN 2012 (MILLONES DE TONELADAS)	OBJETIVO KIOTO EN 2012 (%)	EMISIONES REALES (%)
ALEMANIA	1232.4	939.	-21.0	-23.62
AUSTRIA	79.0	80.1	-13.0	4.91
BÉLGICA	145.7	116.5	-7.5	-14.04
DINAMARCA	69.3	51.6	-21.0	-15.03
ESPAÑA	289.8	340.8	15.0	23.68
FINLANDIA	71.0	61.0	0.0	-4.69
FRANCIA	563.9	490.1	0.0	-9.96
GRECIA	107.0	111.0	25.0	11.87
HOLANDA	213.0	191.7	-6.0	-6.39
IRLANDA	55.6	58.5	13.0	10.96
ITALIA	516.9	460.1	-6.5	-4.16
LUXEMBURGO	13.2	11.8	-28.0	-8.74
PORTUGAL	60.1	68.8	27.0	20.23
REINO UNIDO	776.3	580.8	-12.5	-23.18
SUECIA	72.2	57.6	4.0	-15.31
EU-15	4265.5	3619.5	-8.0	-11.85

Tabla 2.1 Emisiones de gases de efecto invernadero de la UE (fuente EEA)

Actualmente nos encontramos en el segundo periodo de compromiso, transcurre durante los años 2013 y 2020, y en esta segunda fase se unieron la UE, otros países europeos y Australia, comprometiéndose a realizar nuevas reducciones de sus emisiones. En el caso de la UE se comprometió a una reducción del 20% de las emisiones respecto al 1990 (Naciones Unidas, 2015), con los valores obtenidos al final del primer periodo se puede asegurar que está en buen

camino para alcanzar los objetivos fijado para el año 2020. En este segundo periodo los derechos de transferencia de emisiones serán limitados para evitar así la venta entre países y evitar así el “maquillaje” de valores.

2.2.1. Efecto invernadero

El efecto invernadero es uno de los principales problemas relacionados con el cambio climático, este efecto esta acentuado por la actividad económica humana, responsable de generar las mayores emisiones de gases de efecto invernadero, como por ejemplo el dióxido de carbono y el metano. Este fenómeno evita que parte de la radiación infrarroja emitida por la Tierra se vaya fuera de la atmosfera. En la atmosfera se acumulan estos gases dañinos, y estos absorben la radiación de la Tierra, incrementando así la temperatura de la de la misma y generando así, un efecto parecido al observado en un invernadero. Este efecto se ve reforzado principalmente por la quema de combustibles fósiles; a través de la tala y destrucción de bosques y ambientes naturales o la destrucción de ecosistemas marinos y acuáticos a través de la contaminación irracional e irresponsable.

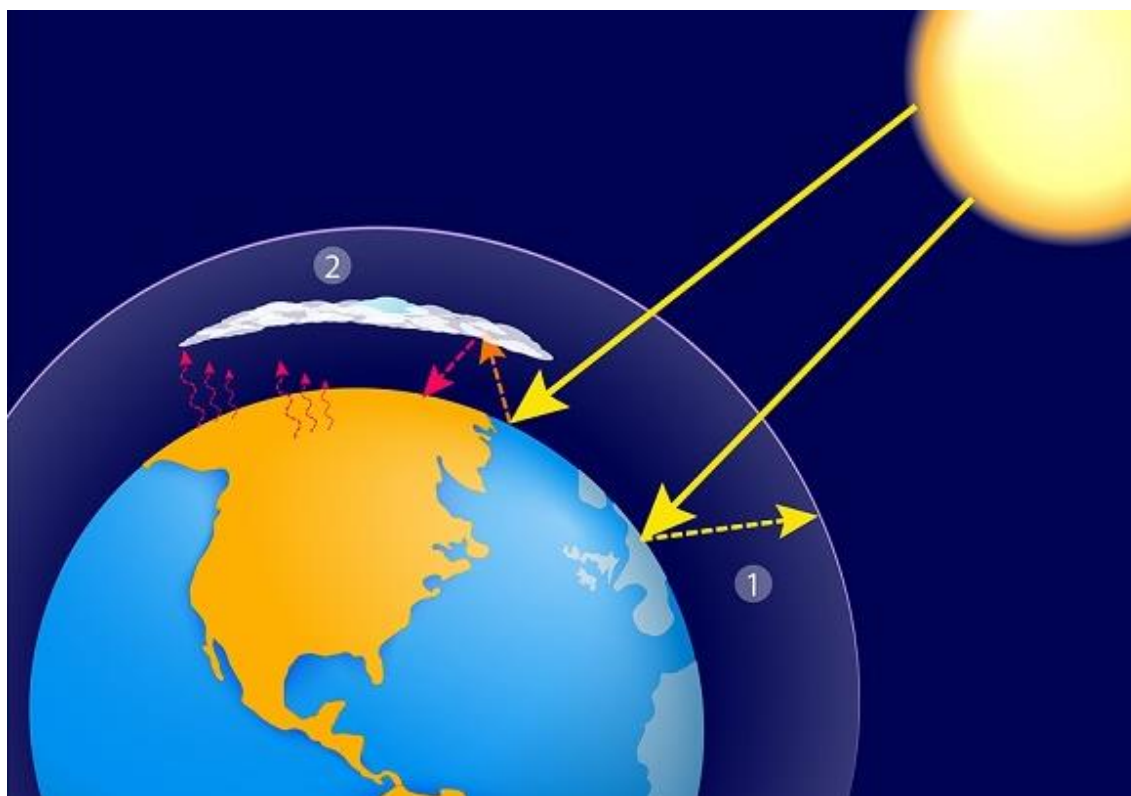


Figura 2.2. Efecto invernadero

En el esquema que se presenta en la fotografía 2.1 se ve como parte de la radiación solar (1) es reflejada y se devuelve al espacio, pero la mayor fracción es absorbida por la tierra, calentando así la superficie terrestre. Al mismo tiempo, la Tierra emite radiación infrarroja hacia la atmosfera, parte de esta radiación la atraviesa, pero otra parte es absorbida y re-emitida, debido a los gases de efecto invernadero, hacia todas direcciones (2). El resultado es el calentamiento de la superficie terrestre y la atmosfera, conocido como calentamiento global. Actualmente la temperatura terrestre es un grado superior que, en el inicio del siglo XX, y estamos llegando al umbral critico de estar a 2°C por encima si no se aplican medidas urgentes (Organización meteorológica mundial, 2015). Cada año se aumentan las temperaturas máximas

en la superficie terrestre y principalmente en la superficie del mar, el 93% del exceso de calor se acumulan en los océanos reduciendo en consecuencia la extensión de los hielos marinos.

2.3. GENERACIÓN DE RESIDUOS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

La industria de la construcción genera un gran impacto en el medio ambiente. Principalmente, a causa de la gran cantidad de los residuos que se producen en obras o procedentes de demoliciones. Además, y no menos importante, los residuos generados en el proceso de fabricación de los materiales de obra (especialmente las emisiones de gases y las aguas residuales) son los más nocivos dentro de esta industria. Uno de los materiales que comporta una mayor contaminación de la atmosfera es el cemento, su proceso de producción consiste en calcar áridos, por lo que requiere altas temperaturas con la quema de materia fósil emitiendo altas cantidades de emisiones de efecto invernadero.

2.3.1. Emisiones de gases

La producción de cemento genera un 5 % del total de las emisiones de (C.A. Hendriks, 2003), siendo una de las industrias que más carbono emite a la atmosfera. Este hecho comporta que la industria cementera tenga un alto control, y en algunos casos, restricciones de emisiones para evitar el continuo crecimiento de los valores de CO₂. Aunque se ha conseguido reducir las emisiones por tonelada de cemento producido, los valores siguen ascendiendo. Desde 1990, los valores de CO₂ producido han seguido aumentando a un mayor ritmo a causa de la fabricación de cemento para abastecer la demanda creciente del sector de la construcción.

La materia prima para la producción de cemento se le denomina *Clinker*. Ésta materia está formada principalmente por silicato de calcio proveniente de la piedra caliza. Se le añade argila, arena y óxido de hierro (Fe₂O₃). Todas las materias primas se mezclan para seguidamente ser trituradas y molidas hasta que queden en sustancia de polvo. El proceso de calcinación se inicia en un precalentador, en donde se comienza el calentamiento del *Clinker* con aire y, posteriormente, se coloca dentro de un horno rotatorio, el cual irá amplificando por fases la temperatura hasta un máximo de 1450 °C. Estas altas temperaturas descarbonatan el carbonato de calcio (CaCO₃), liberando así el CO₂, formando un producto final llamado cal (CaO). Finalmente, el *Clinker* es enfriado a base de aire, y el exceso de calor es redirigido a la fase de precalentamiento inicial. El producto final es el cemento Portland, un polvo muy fino del orden de 10 micras. Del CO₂ producido durante la fabricación de este producto, un 65% es generado dentro del horno durante la calcinación del *Clinker*, y el 35% restante es debido a la quema de combustible para el calentamiento de los hornos rotatorios. Los valores de CO₂ emitido por kilo de cemento producido rondan 0.83 kilos (Natesan Mahasenan, 2003). El principal productor y exportador de cemento en el mundo es China, el año 2016 fabricó 2.410 Mt de cemento [Tabla 2.2] produciendo así más de 2000 millones de toneladas de este gas principal causante del calentamiento global.

	Producción de cemento (Mt/año 2016)
CHINA	2.410
INDIA	290
ESTADOS UNIDOS	85.9
TURQUÍA	77
VIETNAM	70
INDONESIA	63
BRASIL	60
RUSIA	56
COREA DEL SUD	55
IRÁN	53

Tabla 2.2 Producción mundial de cemento (www.statista.com)

Con los valores de CO₂ en crecimiento, existe la necesidad real de reducir el impacto ambiental generado por el sector. Las aplicaciones de las siguientes técnicas reducen las cantidades de CO₂ en la producción de cemento:

- Utilizar métodos secos más eficientes que los húmedos, por lo que, a menor humedad en el Clinker, menores las emisiones de CO₂.
- Potenciar el uso de materias primas nuevas que reduzcan la ratio de emisión de CO₂ durante la descarbonatación.
- Potenciar el uso de cementos con adiciones, adiciones como cenizas volantes o escorias de altos hornos. Al no ser procesados en el horno se reduce; el CO₂, la energía necesaria para la fabricación de cemento, y además se le otorga al hormigón de mejores prestaciones con el reciclado de residuos de otras industrias.
- Utilización de combustibles alternativos a los fósiles, por ejemplo, biomasa o caucho reciclado que tienen el mismo poder calorífico, y optimizar la eficiencia de calentamiento del horno y otras instalaciones.

Además del CO₂ generado durante el proceso de fabricación, también se forman otros gases como óxidos nitrosos (NO_x) y dióxido de azufre (SO₂). Los óxidos nitrosos se producen durante la quema de combustible, cuanto mayor temperatura se quiera alcanzar, mayores cantidades de óxidos nitrosos se generan. En el caso del uso de carbón para la combustión, los valores de óxidos nitrosos son menores, pero hay un cierto incremento en las emisiones de CO₂. Este gas nitroso actúa sobre el medio formando un fenómeno llamado efecto isla, envolviendo las ciudades de una neblina contaminante que reduce la calidad del aire, y además resulta dañina para la salud de los habitantes, muy común en regiones industrializadas de China y países del este de Asia. Respecto al impacto generado por el dióxido de azufre, a valores altos de azufre disuelto en la atmosfera, mayor probabilidad de lluvia ácida (o smog), y a la vez, puede generar ciertos problemas respiratorios. Este gas de azufre se genera en menor parte en la quema del combustible, pero la mayor proporción es producida durante la quema de la materia prima. Durante la calcinación se liberan los sulfuros presentes al árido, pero la propia naturaleza reabsorberá entre un 70 % y 90 % de los sulfuros emitidos por la materia prima.

La producción de cemento emite en mayor cantidad comparado con los gases, partículas sólidas a la atmosfera, al no contener partículas toxicas no se las considera nocivas y de menor importancia, pero con un control estipulado. Aunque no son realmente dañinas, las partículas sólidas pueden afectar a los campos agrícolas cercanos a los focos de emisiones. Además, pueden causar problemas de respiración para los trabajadores o habitantes de poblaciones colindantes.

2.3.2. Emisiones sólidas

Los residuos sólidos, generados por el sector de la construcción, acaban en mayor parte acopiados en vertederos, principalmente, son procedentes de obras nuevas, de demoliciones o bien de plantas de prefabricado. El “boom” inmobiliario ha generado un crecimiento de los desechos procedentes del sector de la construcción. En la Unión Europea (UE-24) se generan anualmente, en la construcción y la demolición, más de 850 millones de toneladas de residuos, el que representa el 31% de total de los residuos (Fisher, 2009). Gran parte de estos residuos, al ser el material más usado en las construcciones, es el hormigón que puede representar entre un 40% hasta un 67% del peso de los residuos producidos en los sectores de la construcción y de la demolición (ISO/TC, 2005).

La creación de leyes y de tasas de vertido ha sido una solución o medida ecológica para los países desarrollados, para así poder preservar los recursos naturales y frenar el crecimiento de los vertederos. A la vez, se pretende imponer el hábito de reciclar, para que una separación selectiva del material facilite su posible reutilización. Se están implantando líneas de reciclado de material de construcción para poder separar los diferentes subproductos del residuo, ya separados en obra. Hay que poner hincapié a una separación inicial en obra, ya que técnicamente es imposible de reciclar materiales mezclados al tener propiedades físicas y químicas diferentes e incluso puede afectar a la maquinaria encargada del proceso de reciclado. Principalmente en las obras se clasifican los materiales en tres subgrupos, expuestos seguidamente. En la obra es necesario realizar un seguimiento cuantitativo y cualitativo de los residuos que se vayan a generar para poder planificar su correcto tratamiento de reciclado o eliminado, a posteriori.

- Materiales pétreos o de interés (escombros):
 - o Ladrillos
 - o Tejas
 - o Azulejos
 - o Hormigón y mortero endurecido
- Materiales no peligrosos:
 - o Metales (armadura, perfiles metálicos y paneles de encofrado en mal estado)
 - o Madera (palets y restos de encofrado)
 - o Papel y cartón (sacos y cajas de material de obra)
 - o Plásticos (conductos y canalizaciones, lonas y cintas de protección)
 - o Vidrio
- Envases y restos
 - o Aceites, lubricantes, líquidos de freno y combustible
 - o Desencofrantes, anticongelantes y líquidos para el curado del hormigón
 - o Pegamentos, pinturas, barnicería y siliconas
 - o Otros productos con productos tóxicos

Residuos de hormigón, tejas o ladrillos, pueden ser objeto de reciclado para la producción de áridos de construcción secundarios. Además de estos materiales que se les podría clasificar como escombros, muchos otros que de ser recogidos selectivamente presentarían un valor de mercado obvio, como en el caso de maderas o plásticos que pueden ser objeto de valorización energética de la que ya existe una demanda para estos materiales secundarios. Otras medidas tomadas por los diferentes Estados Miembros de la Unión Europea ha sido invertir en ayudas a I+D para proyectos de gestión de residuos que se centren en el reciclaje.

Como última alternativa al reciclado del material, se usará la eliminación. Se realizarán depósitos habilitados, para que se asegure una impermeabilidad con el suelo así aislarlo de corrientes subterráneas de agua. Se realizará un correcto cubrimiento regular de los residuos y

en caso de posibilidad de generación de fermentación, se tendrá que instalar una correcta evacuación del metano para evitar posibles incendios o explosiones.

A nivel Estatal aún hay mucho camino por recorrer en el marco del reciclaje. Actualmente el Real Decreto 105/2008 promueve y regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. A causa de tener unos precios de vertido bajos no se está creando una exigencia del reciclaje, se le suma que en muchas Comunidades Autónomas las sanciones por incumplimiento no existen o son realmente bajas. También añadir, que el precio del árido natural es muy bajo por lo que no hay una necesidad de uso de árido reciclado, con la consecuencia de que hay pocas machacadoras dedicadas a la producción de este material reciclado. Es necesario para empezar a conseguir altas cotas de reciclaje en España a medida de altos precios de vertido a los residuos de no interés, los que no tienen posibilidad de re ciclado e incentivos económicos a las Administraciones para aplicar líneas de separado de escombros.

2.4. REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS

La industria cementera está consumiendo gran cantidad de arena y roca para la producción de hormigón, causando gran impacto ambiental en las extracciones. A día de hoy, ya se está trabajando en hormigones en donde parte del agregado es hormigón reciclado o hormigones con cementos fabricados a partir de material natural y reciclado. Resulta importante encontrar una segunda vida a los residuos generados por la industria de la construcción y fabricar hormigones ecológicos producidos a base de materiales reciclados. Si se reutilizan estos residuos en el ciclo de producción se reducirá la materia prima natural necesaria. Además, en muchos casos, el mismo residuo de demolición servirá como relleno en procesos de la obra nueva que se construirá después., ayudando también a reducir la necesidad de material natural para la construcción.

2.4.1. Reutilización de hormigón para la fabricación del cemento

La industria cementera esta aumentado los valores de extracciones en las canteras a causa de la continua y creciente demanda de cemento para la industria de la construcción. Países como Bélgica, Dinamarca o Holanda usan solo un 20% de material natural para la producción de cemento, estos países son los más vanguardistas en reutilizar material reciclado para la producción de cemento.

Estudios realizados por investigadores de prestigiosas universidades demuestran la posibilidad de producir cemento con solo una pequeña parte de material natural siempre rondado una cuarta parte del peso total del *Clinker*. Tal y como se concluyó en un estudio realizado por los profesores Nele de Belie, et al. (*Fines extracted from recycled concrete as alternative raw material for Portland cement clinker production*, 2015) en la Universidad de Gantt (Bélgica), se puede producir cemento con parte de la materia prima natural sustituida por hormigón reciclado. Su investigación reutiliza hormigón procedente de una demolición colindante, dos factorías independientes se encargaron del proceso de machacado y triturado en un polvo muy fino, y finalmente, la calcinación. A partir de análisis de difracción de rayos X realizados en tres universidades diferentes, para así aumentar la precisión de los resultados, se obtiene las composiciones mineralógicas, estos valores se comparan en el informe con los valores de referencia de las Universidades de Antoin (Ant.), Lixhe (Lxh.) y Maastricht (Maa.) [Tabla 2.3], de probando así la posibilidad de producir un cemento reciclado con mismas características mineralógicas.

En estudios anteriores realizados por el mismo equipo de investigadores de la Universidad de Gant, se obtuvieron valores bajos en la alita, produciendo durante el fraguado,

una baja reactividad del cemento. En esta última investigación lo corrigieron con la adición de arena reciclada del 10% del peso de la mezcla del *Clinker*. La arena aumenta los valores de alita en el cemento reciclado, alcanzando los valores de un cemento tradicional con material natural.

CLINKER	FACTORÍA 1			FACTORÍA 2			VALORES REFERENCIA		
	Analizado en:			Analizado en:			Universidad de Antioing	Universidad de Lixhe	Universida d de Maastricht
	Ant.	Lxh.	Maa.	Ant.	Lxh.	Maa.			
Alita (C ₃ S)	66.56	57.66	61.48	65.90	66.34	55.91	64.52	65.04	71.33
Belita (C ₂ S)	18.45	24.22	21.42	19.74	15.81	26.25	19.73	14.93	8.56
Aluminato de calcio (C ₃ A)	1.85	3.04	4.31	2.25	3.41	2.99	1.79	3.68	4.64
Ferrita (C ₄ AF)	12.50	14.43	12.11	11.63	14.83	14.30	12.86	15.87	14.89
Oxido de calcio (CaO)	0.11	0.34	0.22	0.07	0.51	0.03	0.23	0.23	0.35
Periclase (MgO)	0.26	0.22	0.37	0.25	0.05	0.28	0.39	0.18	0.23
Arcanita (K ₂ SO ₄)	0.07	-	-	-	-	0.01	0.32	0.07	-

Tabla 2.3 . Composición mineralógica obtenida en el estudio de los profesores Nele de Belie et al. 2015

2.4.2. Reutilización de hormigón para la fabricación del hormigón

La reutilización de hormigón como agregado en la producción de hormigón ya es una técnica de reciclaje aplicada en el sector de la construcción desde hace décadas. La necesidad de poder reciclar la mayor cantidad posible de hormigón residual, ha dado a cabo a numerosas investigaciones para conseguir unas características de resistencia y durabilidad cercanas a la de un hormigón tradicional producido con materia prima natural. Para obtener una mayor calidad de hormigón es necesario el uso hormigón de las mismas características o mayores del nuevo hormigón que se quiere producir como agregado. Los hormigones con agregado reciclado necesitaran una cantidad mayor de agua o superplastificantes, comparado con el hormigón de agregados naturales.

El uso de hormigón reciclado como agregado en la mezcla de hormigón ha demostrado en numerosos estudios, que se puede producir un hormigón de calidad, pero con alguna reducción en la resistencia mecánica. La resistencia a compresión decrece por lo general, en el uso total de material reciclado un 25% a la de un hormigón con agregado natural y misma relación agua/cemento (Ajdukiewicz, 2002). También la resistencia a flexión y el modulo elástico obtienen valores menores en el caso de utilizar el material reciclado, un 10% y 45% de perdida de resistencia respectivamente (Ajdukiewicz, 2002). Sin embargo, estas reducciones de propiedades no son un problema, dado que en ciertas partes estructurales no hay una excesiva carga expuesta. Por el lado de la durabilidad, destacar que se clasificará como un hormigón que no será óptimo para el uso en casos de ambientes climáticos extremos.

En el siguiente estudio realizado en la Universidad de Belgrado, Serbia (Ajdukiewicz, 2002), se hace un análisis comparativo de resistencia a compresión entre un hormigón con agregado natural y un hormigón con un 65% del agregado natural substituido por hormigón proveniente de una demolición de las mismas características y una edad de 30 años. Al no tener una substitución total del material natural las limitaciones a esfuerzos no se verán tan reducidas.

Para una mayor plasticidad en la mezcla reciclada, fue necesaria una adición de agua [Tabla 2.4] a la mezcla del hormigón ya que la absorción del agregado es mayor que al natural. Para el estudio se diseñaron 3 probetas de valores diferentes, como se puede ver en la siguiente tabla, para cada tipo de hormigón; con agregado natural (AN) y con parte del agregado reciclado (AR).

	Cemento (kg/m ³)	Agregado (kg/m ³)		Agua (kg/m ³)	Agua añadida (kg/m ³)	a/c	Resistencia a compresión a los 28 días (MPa)
		Natural	Reciclado				
AN – 1	300	1902	-	179	-	0.60	36.6
AN – 2	353	1854	-	182	-	0.52	41.8
AN – 3	402	1798	-	188	-	0.47	48.6
AR – 1	300	611	1134	179	40	0.60	33.6
AR – 2	351	596	1107	183	39	0.52	41.1
AR – 3	402	579	1074	189	29	0.47	48.1

Tabla 2.4 Ensayo a compresión de mezclas con AN y AR (Ajdukiewicz, 2002)

Se observan unos valores de resistencia a compresión ligeramente iguales entre los dos tipos de hormigones, como es lógico al tener mejores materiales el hormigón con agregado natural total tiene mayor resistencia. No obstante, los valores conseguidos con el uso del agregado natural son notablemente destacables al dotar de una resistencia a 28 días próxima al producido con material natural. Con esto se demuestra que una correcta dosificación entre agregado natural y agregado de hormigón reciclado puede reducir el impacto generado por el sector. La normalización del uso de este tipo de mezclas frenaría las cantidades de árido extraído en las canteras y sería una solución para la reducción de los residuos cementicios provenientes de la demolición. Cada año en la Unión Europea se destina 3 billones de toneladas de agregado para la producción de hormigón (European Environmental Agency, 2009).

2.5. CAPTACIÓN DE CO₂

La necesidad real de reducir los valores de dióxido de carbono disuelto en el aire a promovido distintas investigaciones que han elaborado diferentes elementos constructivos capaces de absorber y almacenar el CO₂, disminuyendo así sus concentraciones disueltas en el aire. A continuación, se presentan una serie de aplicaciones en el sector constructivos capaces de mejorar la calidad del aire.

2.5.1. Baldosas absorbentes de CO₂

Podemos dotar el hormigón de la capacidad de absorción de CO₂ incorporando, a la mezcla, una adición patentada y desarrollada como GeoSilex de la empresa Trenza S.L. y la Universidad de Granda. Esta innovadora adición se fabrica con residuos que provienen de la producción de acetileno, cuando se añade al hormigón utilizado en fachadas o superficies se generan superficies capaces de absorber el CO₂ en el aire.

La huella del carbón en la fabricación está totalmente amortizada, ya que, su absorción será mayor, con unos valores por metro cuadrado de baldosa (proporción del 8% del peso del hormigón) de 5000 m³ de aire con exceso de CO₂. Se le incorpora a la mezcla una proporción del 3-10% del peso del hormigón. Estos resultados más óptimos se dan en baldosas a pie de calle, las baldosas en la calle absorben mayor cantidad que elementos verticales o pavimentos elevados al tener una densidad mayor el CO₂ que el aire. El principio activo es el hidróxido de calcio, encargado de transformarse en piedra caliza al entrar en contacto con el CO₂ disuelto en el aire. A medida que el dióxido de carbono penetra por los poros de la baldosa se va petrificando. Estas baldosas producidas por la empresa GeoSilex tienen una vida útil de entre 12 y 15, igual

que las aceras convencionales. Presentan mismas características en estética cumple las exigencias frente al desgaste, roturas y resbalones (GeoSilex, 2011).



Figura 2. 3 Baldosas producidas por la empresa GeoSilex

2.5.2. Entramado de metal orgánico secuestrador de CO₂

Mediante un entramado de metal orgánico se puede capturar y almacenar el CO₂ disuelto en el aire (Martin Schröder, 2017). Una nueva clase de material poroso se ha producido en los laboratorios de la Universidad de Nottingham. La estructura del material permite la absorción selectiva de los gases. Permite retener el dióxido de carbono y dejar pasar otros gases, como por ejemplo: metanos o nitrógenos. Cada unidad se estima que podrá retener un 23.7 % respecto su peso. Su estructura única permite a este material tener estas propiedades, se tuvo que encontrar la relación óptima del entramado metálico entre la superficie de contacto respecto a la densidad del mismo.

2.5.3. Fachadas biológicas

El grupo de Tecnología de Estructuras de la facultad de Caminos de la UPC, ha desarrollado un novedoso hormigón capaz de generar en su entramado de poros determinado organismos biológicos. Desde el punto de vista medioambiental ofrece la ventaja de poder absorber el CO₂ gracias al recubrimiento biológico.

Este tipo de fachada está formada por multicapas, aparte de la capa estructural, se forma de tres capas más. La capa más interna al edificio es la de impermeabilización necesaria para que la humedad exterior no penetre al interior. La siguiente capa es donde los organismos biológicos se formarán entre los poros del hormigón, la cual permitirá la acumulación del agua en su interior. Finalmente, la capa más externa, es la encargada de absorber el agua en su interior, pero a la vez bloquea la salida, así permite almacenar la mayor cantidad de agua de lluvia para el crecimiento biológico. La clave de la investigación fue encontrar un hormigón capaz

de albergar este tipo de elementos biológicos. Se ha modificado el pH del hormigón que mejoran la bioreceptividad del material. Este material al tener el pH modificado sus características porosas y de rugosidad superficial se verán mejoradas para la reproducción de distintas especies de organismos. Este conjunto de multicapas, como si un panel fuera, tiene la capacidad de absorber la radiación solar, lo que reduce la transferencia de calor exterior al interior, librando así consumo de energía de los sistemas de climatización.

Aparte de las ventajas medioambientales y térmicas, sus ventajas estéticas también son destacables. Las tonalidades de la fachada producidas por la colonización biológica varían durante las estaciones y a la vez se podría usar en elementos constructivos en zonas naturales o zonas ajardinadas para su integración paisajística y reducir cierto impacto visual que pueda generar en el entorno.

2.6. CONCLUSIONES

De acuerdo con lo expuesto, se observa y se confirma que la generación de CO₂ en la industria es una problemática general, debido a que en todo el planeta se están emitiendo unos valores muy altos de carbono. En consecuencia, ha surgido la necesidad de regular legislativamente los gases de efecto invernadero, problemática principal del calentamiento global.

Dentro de la industria de la construcción, la industria que más impacto medioambiental genera es la cementera. Ésta se ha visto obligada a aplicar nuevas técnicas para reducir dichas emisiones: la utilización de nuevas materias primas para reducir la ratio de emisión en la descarbonatación o el uso de combustibles alternativos más ecológicos, entre otras.

Por otro lado, en la industria de la construcción existe una generación de residuos muy elevada en las obras de nueva construcción y en las demoliciones. En consecuencia, ha surgido la necesidad de reutilizar los materiales para así descongestionar los vertederos y reducir las cantidades a extraer de las canteras.

De acuerdo con los estudios expuestos, el hormigón residual puede ser reutilizado para la fabricación de cemento y como agregado en la producción de hormigón. Con esta reutilización, se puede conseguir un resultado muy parecido (aunque de momento, algo inferior) a la calidad del hormigón estándar.

Los elementos constructivos captadores de CO₂ son otro método existente para la reducción del mismo en el planeta. Algunos ejemplos de éxito son las baldosas producidas por la empresa Trenza S.L. y las fachadas vivas; ambos captadores de CO₂ del aire.

CAPÍTULO 3.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha expuesto el impacto ambiental generado por la industria cementera, a la vez que se han listado los diferentes métodos para poder reducir el daño ambiental. Además, se ha explicado lo ventajoso que resulta la reutilización de materiales cementicios para la fabricación de cemento o de hormigón, siendo una estrategia clave para la reducción de emisiones de efecto invernadero y de consumo de materia prima natural.

En este capítulo se describen las características de los materiales empleados, sus composiciones químicas y los equipos utilizados en los diferentes ensayos. Seguidamente se presenta el programa experimental que se ha seguido con el fin estudiar la viabilidad del filtro de hormigón reciclado. En la campaña experimental se han expuesto diferentes tipos de hormigones reciclados a gran cantidad de CO₂ con el fin de evaluar su capacidad de absorción, para ello, mediante una autoclave se ha generado una atmosfera controlada de 100% CO₂ en el interior de ella.

3.2. METODOLOGÍA

El objetivo de esta campaña experimental es evaluar la capacidad para capturar CO₂ con la carbonatación del hormigón, para ello se utilizarán residuos usuales de la industria del hormigón. Se han utilizado dos tipos de residuos: hormigón procedente de una planta de prefabricados y polvo de corte de hormigón. El residuo de hormigón ha sido molido a diferentes granulometrías, así se ha evaluado la relación superficie de árido respecto la absorción de CO₂. Posteriormente ha sido introducido durante 3 días en depósito hermético a una atmosfera controlada de 100% de CO₂ en el aire. Para ello, se ha tenido que determinar las diferentes absorciones de agua para que la muestra estuviera totalmente saturada durante el ensayo. El

ensayo de carbonatación se ha realizado en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona (EPSEB) que me han cedido una autollave para generar una atmosfera controlada en el interior. Los ensayos para la caracterización del material se realizaron en el Laboratorio de Materiales de la ETSICCPB y en los Servicios Centrales de Investigación (SCAI) de la Universidad de Málaga. En la caracterización de los residuos se han utilizado las técnicas de difracción de rayos X y análisis térmico, con la comparación de los resultados previos a la exposición de CO_2 con la composición química final se ha evaluado el carbonato de calcio producido.

3.2.1 Materiales utilizados

Con el fin de capturar la máxima cantidad de CO_2 en esta campaña se han elegido residuos procedentes de planta de prefabricados de hormigón. Su elección viene dada por su mayor cantidad de cemento activo, los hormigones utilizados en la industria de prefabricados son de consistencia seca, hecho que comporta que durante el fraguado una parte del cemento no carbonata por la falta de agua y permanece sin reaccionar en el interior de la pieza de hormigón. A la vez, para la producción de los hormigones de piezas prefabricadas se utiliza cemento Portland tipo I, este tipo de cemento no contiene adiciones por lo que hay una mayor porción de Clinker, esto conlleva una mayor proporción de cal. A mayor proporción de cemento activo, mayor probabilidad de capturar CO_2 .

Los hormigones utilizados en las plantas de prefabricado son de consistencia seca con el fin de acelerar la producción. Al tener una menor cantidad de agua en el hormigón se obtiene una resistencia inicial alta a priori que nos reduce el tiempo de encofrado. Esta reducción de agua también dota de una mayor resistencia final de las piezas y una mayor durabilidad, principales ventajas de los elementos prefabricados. El uso de elementos prefabricados en la construcción comporta la reducción notablemente del peso propio de la estructura, ya que a una misma capacidad de carga siempre el hormigón in situ va a necesitar más sección que un elemento prefabricado, por lo que podremos trabajar con elementos más esbeltos.

Para la campaña experimental se han utilizado dos tipos de hormigones procedentes de la fábrica de prefabricados de la empresa Pujol S.A. de Mollerussa. El segundo residuo utilizado fue polvo de corte de piezas de hormigón, este tipo de residuo tiene una granulometría muy fina (menor de 0.063mm). Fue facilitado por el Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló, generado en el corte de piezas de hormigón del mismo laboratorio. Este residuo no proviene de un solo tipo de hormigón por lo que su composición química es el resultado de la mezcla de polvo de diferentes hormigones.

3.3. FASE 1 . PREPARACIÓN DEL MATERIAL Y CARACTERIZACIÓN QUÍMICA INICIAL

Con el fin de evaluar la captación de CO_2 del material cementicio, se ha considerado trabajar con diferentes granulometrías por tal de analizar la relación entre superficie exterior de contacto respecto la absorción. En la primera fase de la campaña experimental, se ha estudiado la composición química mediante ensayos de difracción de rayos X y análisis térmico de las diferentes granulometrías y hormigones usados. Primeramente, se ha reducido el volumen de los bloques de hormigón mediante la máquina de ensayo a compresión y posteriormente se ha triturado con un triturador de material de dientes metálicos de la escuela de Caminos. Una vez triturado se ha separado a diferentes granulometrías, seleccionadas y separadas a partir de tamices, cogiendo los granos pasados por el tamiz de 10 mm y retenidas en los diferentes

tamices menores con el orden de valores de 8 mm, 6.3 mm, 4 mm, 1 mm, y polvo sobrante pasado por el tamiz último de 1 mm.

Respecto al hormigón de polvo de corte, al tener una granulometría menor de 0.063 mm no ha sido necesario ninguna trituración para la campaña experimental, ni tampoco para conocer la composición química con los ensayos de DRX y térmico. No obstante, sí que se tuvo que estudiar su absorción de agua que nos dan a conocer la cantidad de agua necesaria para tenerlo completamente saturado para una óptima carbonatación durante el ensayo de captación de CO_2 posterior.



Figura 3.1. Separación mediante tamices del hormigón



Figura 3.2 Material separado por granulometrías

3.3.1. Difracción de rayos X (DRX)

El objetivo de este ensayo ha sido la determinación de la composición química de los residuos de hormigón. Esta técnica usada antes y después de la exposición del hormigón a una atmosfera controlada de 100% de CO₂ da a conocer cualitativamente la estructura cristalina del hormigón.

El fundamento de esta técnica reside en el fenómeno conocido como dispersión “scattering” de una radiación X, cuando este incide con el material. El ensayo de difracción de rayos X es una técnica para el análisis de materiales cristalinos, consiste este fenómeno en que parte de la radiación X incidente se desvíe de su dirección original por la interacción con el material analizado. La reflexión de los rayos varía entre los diferentes planos formados por los átomos, a la vez la muestra está girando para poder coger la reflexión en todos los grados. Cada vez que la radiación choca con un plano de la misma familia se produce una interferencia y el detector genera un pico en el difractograma.

Para ello, primeramente se prepararon las muestras para el ensayo de DRX, cogiendo muestras de los diferentes tipos a ensayar para tritarlo hasta un polvo muy fino con el molino

de anillos metálicos del laboratorio de materiales de la Facultad de Caminos. Todo el material seleccionado para ensayo DRX ha sido molido y pasado por el tamiz 0.074 mm para tener una medida de grano correcta para el ensayo, el cual debe ser mayor de 0.1 mm.

Este ensayo se ha realizado con el equipo de difracción de rayos X del CCIT de la Universidad de Barcelona. El equipo utilizado fue el modelo *PANalytical X'Pert PRO MPD Alpha1* y las siguientes condiciones experimentales:

- Cu K α 1 radiación ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$).
- Trabajo de polvo: 45 kV – 40 mA.
- Frecuencia de 2 revoluciones por minuto
- Longitud de onda de la muestra en dirección axial de 12 milímetros
- Difracción de onda de 0.04 radianes
- X'Celerator Detector: Longitud = 2.122 °.
- $\theta/2\theta$ escaneado des de 4 hasta 80° 2 θ , medido en intervalos de 0.017° y midiendo cada 80 segundos.



Figura 3.4 Molino de anillos metálicos



Figura 3.3 Bandeja con material molido por los anillos metálicos

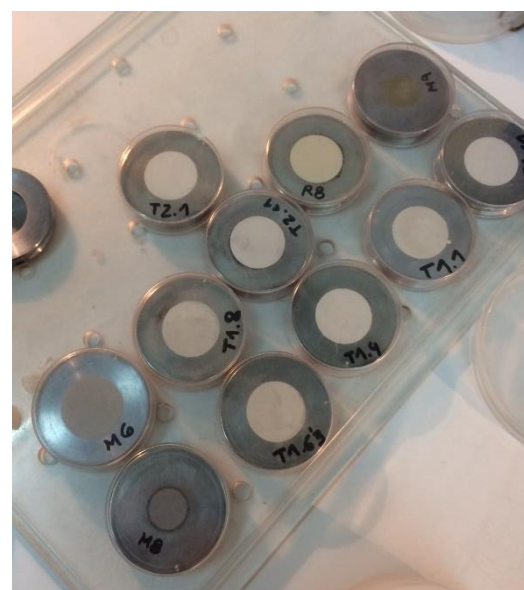


Figura 3.5. Muestras preparadas para DRX

3.3.2. Análisis termogravimétrico (TGA)

El uso del análisis térmico mediante la termogravimetría tiene como objetivo para esta campaña experimentación, la cuantificación de la Portlandita y el carbonato de calcio. Un análisis termogravimétrico se registra, de manera constante la masa de la muestra. La variación de la masa puede ser experimentada en este ensayo debido a dos alteraciones, en el primer caso será debido a un aumento de la temperatura, a velocidad constante. Este primer caso se le nombra experimento dinámico y consiste en un aumento controlado de la temperatura, evaluando así, las pérdidas de masa ocasionados en función del tiempo y la temperatura. La representación de la masa en función del tiempo y la temperatura se le denomina termograma o curva de descomposición térmica. El segundo caso, tiene una temperatura lineal en el tiempo con la muestra en el interior de una atmosfera controlada, este es llamado experimento isoterma. En esta tesina no interesa conocer la pérdida de masa entre unos intervalos concretos de temperatura, por lo que usaremos el experimento termogravimétrico tipo dinámico para el análisis. Estos cambios afectan a la estructura cristalina conllevando variaciones más o menos importantes. En el caso del hormigón, entre las temperaturas de 440 °C hasta 580 °C se genera la primera pérdida de masa debido a la deshidroxilación de la Portlandita, y entre los intervalos de temperatura de 780 °C y 1000 °C se obtiene la descarbonatación del carbonato de calcio (CaCO_3), ambos datos serán estudiados. Mediante las pérdidas de masa del material se genera una curva termogravimétrica, donde en los intervalos indicados se cuantifica la reducción significativa de masa producidas por la descomposición los diferentes componentes del hormigón.

Para este ensayo se envió una fracción de cada muestra a analizar en los Servicios Centrales de Investigación (SCAI) de la Universidad de Málaga. Allí se utilizó el analizador térmico *Mettler Toledo* modelo TGA/DSC 1m. Este, es capaz de medir simultáneamente valores termogravimétricos (TG) y calorimetría de barrido diferencia (DSC), de muestras con un valor mínimo de 10 µg. Este módulo, consta de un horno horizontal (modelo HT1600) que trabaja hasta una temperatura máxima de 1600 °C, en el que durante el ensayo se realizó en un intervalo que empezó a los 30 °C hasta 1200 °C y una ultramicobalanza (modelo MX5) que lleva incorporado un sensor de hilo Pt-Rh (modelo DSC HSS6). Los ensayos se realizaron en crisoles de alúmina de 70 µl y una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. La balanza es refrigerada exteriormente mediante un encamisado conectado a un baño de agua recirculada a 22 °C y está protegida por un flujo continuo de N_2 de 50 ml/min. El quipo dispone de un robot automuestrador con capacidad para 34 muestras y un controlador de gases (modelo GC 200). Los ensayos se pueden controlar y evaluar mediante el programa STARE versión 15.01 de METTLER TOLEDO STARE system. La termo balanza lleva acoplada a la salida un espectrómetro de masas de PFEIFFER VACUUM (modelo ThermoStar TM GSD 320). El rango de medida es de 1-200 uma. Consta de un detector modelo Faraday y otro SEM. El capilar está hecho de cuarzo, el cual opera a 200 °C. Este modelo de analizador térmico tiene una velocidad de escaneo de 2-60 uma/s, esto depende del tipo de escaneo que se realice. El vacío necesario para el ensayo se realiza mediante una bomba de membrana y una turbo, los cuales dotaran de una presión de trabajo del orden de 10^{-6} mbares. Mediante el software Quadera ® versión 4.5, controlan y evalúan los resultados finales, lo que nos presentará en forma de tablas, las distintas pérdidas de masa de las fracciones de muestras analizadas respecto al incremento de temperatura.

Respecto a la preparación inicial del material para el ensayo, también es necesario tener las muestras en polvo, como en el caso del ensayo de difracción de rayos X. También se ha separado diferentes muestras de todas las granulometrías y hormigones, y se ha triturado con el molino de anillos metálicos siguiendo los mismos pasos comentados en el apartado del análisis con DRX. Se utilizaron para los análisis previos a la carbonatación alrededor de 20 mg de cada una de las muestras molidas en polvo (tamaño menor a 90 µm).

3.3.3. Absorción

La absorción es el aumento de peso del material debido al agua que se sitúa en los poros, pero sin incluir el agua adherida en la superficie exterior de las partículas, se expresa en porcentaje respecto el peso seco. Una vez encontrada la absorción de las distintas muestras se ha podido introducir totalmente saturadas, con la cantidad justa de agua para una buena carbonatación, en el autoclave a una atmosfera 100% de CO₂. Se calculan las diferentes absorciones de los hormigones según el método estipulado por la norma UNE-1097-6, donde recoge las distintas formas de estudiar las densidades de partículas y absorciones de agua de los áridos.

Primeramente, para las muestras de hormigón triturado, se han limpiado de los finos impregnados en las superficies del hormigón triturado a base de agua y un tamiz menor a la granulometría. Posteriormente, se han sumergido durante 24 horas en bandejas llenas de agua. Pasado el tiempo estipulado, se han sacado las muestras de las bandejas de agua y mediante un paño absorbente se han secado la superficie y se ha anotado su masa. Seguidamente, las muestras se han introducido 24 horas en un horno a temperatura constante de 100 °C para secarlas al completo y poder anotar su peso en seco. Para una mayor precisión, se han tomado dos porciones de cada muestra de ensayo.

En relación al polvo de corte, segundo material de ensayo, también se ha sumergido durante 24 horas en bandejas con agua. Para la retirada del agua, primeramente se ha utilizado la decantación para la retirada de la mayor parte de agua y, mediante un embudo con un filtro vegetal y un compresor de aire, se ha succionado la parte sobrante para conseguir un valor de peso saturado preciso. Pasadas 24 horas en el horno, se ha tomado la masa en seco. Para una mayor precisión, se han tomado dos porciones de la muestra de polvo de corte a ensayar.

Conocidos los valores de masa saturada y masa en seco, se ha obtenido la absorción de cada tipo de muestra para ensayo y, así, calcular respecto la masa la cantidad de agua necesaria para tener la muestra saturada. Mediante la siguiente formula se han calculado los valores de absorción, resultado expuestos en siguiente capítulo 4.

$$\text{Absorción} = \frac{M_{\text{saturada}} - M_{\text{sup.seca}}}{M_{\text{sup.seca}}} \cdot 100$$

Figura 3.6 Fórmula para el cálculo de la absorción de las muestras



Figura 3.7 Muestras sumergidas en agua

3.4. FASE 2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL Y CARACTERIZACIÓN QUÍMICA FINAL

Una vez preparadas las distintas muestras y conocidas las cantidades de agua necesarias para tener las muestras completamente saturadas, se ha procedido a la segunda fase de la campaña experimental. Mediante una autoclave del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Arquitectura Técnica de la UPC, se han introducido las muestras durante 48 horas en una atmosfera controlada de 100% de CO_2 , generando así una carbonatación acelerada, así estudiar la cantidad de CO_2 que absorben las diferentes muestras de hormigón reciclado. Esta autoclave de laboratorio es capaz de generar un espacio totalmente hermético, manteniendo de esta manera, una atmosfera total de CO_2 . Mediante una puerta enroscada con roscas, queda totalmente estanco el deposito con capacidad de soportar presiones extremas. El CO_2 se ha introducido mediante una bombona de laboratorio con el gas licuado. Pasadas las 48 horas se ha igualado la presión del depósito con la presión exterior para poder abrir y retirar las muestras ensayadas.

Finalmente, se han retirado dos porciones de cada muestra ensayada en el autoclave para realizar los ensayos de difracción de rayos X y termogravimetría. Se han preparado las muestras para este ensayo de la misma manera que al inicio de la campaña experimental, mediante la trituration de las muestras con el molino de anillos metálicos y a la misma fracción granulométrica. Conocidas las composiciones mineralógicas antes y después de la exposición al CO_2 en el siguiente capítulo se expondrán las variaciones producidas por la carbonatación del material.



Figura 3.8 Autoclave para carbonatación con atmósfera controlada de 100% CO₂



Figura 3.9 Muestras en el interior de la autoclave

CAPÍTULO 4.

RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha expuesto la estrategia seguida en la campaña experimental, en donde se explica detalladamente los ensayos llevados a cabo a lo largo de la tesina. El objetivo de la campaña experimental realizada pretende poder demostrar que mediante la “re-carbonatación” de un hormigón residual se puede absorber CO_2 , principal gas efecto invernadero.

El presente capítulo presenta y analiza los resultados obtenidos durante la campaña experimental realizada. Inicialmente se exponen los resultados de absorción y de las pruebas de caracterización química del hormigón antes de ser sometida a la carbonatación. Los valores de absorción fueron necesarios para realizar la carbonatación del hormigón residual totalmente saturado. En relación a la caracterización química inicial, se sometió a un análisis de difracción de rayos X y de termogravimetría, para así, ser comparado posteriormente.

Una vez realizados los ensayos de la primera fase, principalmente para conocer sus propiedades iniciales y absorciones, se ha seguido con la exposición de las muestras a ensayar a una atmósfera 100 % de CO_2 , mediante una autoclave hermética e inyectándole este gas, como se ha explicado en el capítulo anterior. A continuación, se caracterizaron químicamente las muestras ensayadas mediante DRX y termogravimetría. Mediante estos análisis se pretende estudiar la absorción de CO_2 producido dentro del autoclave, a través del aumento de los valores de carbonato de calcio y así probar los resultados supuestos.

4.2 RESULTADOS ENSAYO ABSORCIÓN

Este ensayo se basa en sumergir las distintas muestras para ensayo durante 24h en agua, para luego pesar las muestras de hormigón saturadas y compararlas con el peso de ellas totalmente secas. El objetivo final de ello, es conocer la cantidad necesaria de agua para que las muestras estén saturadas en el posterior ensayo de carbonatación. Es necesaria una total hidratación de la pasta, para así obtener unos valores más óptimos de absorción de dióxido de carbono.

En la siguiente tabla (4.1) se recogen los valores obtenidos durante el ensayo de absorción y también se adjunta el cálculo de agua necesaria para el subsiguiente ensayo. Para una mayor precisión se ensayaron con dos muestras en los casos que se tenía una cantidad suficiente para retirar dos fracciones para este ensayo.

Tipo	Tamiz (mm)	Masa en seco (g)	Masa saturada superficie seca (g)	Absorción (%)	ABS _{MEDIA} (%)	Masa muestra ensayo CO ₂ (g)	Agua para saturación (g)
1	<1	6,6	10,9	65,2	65,15	18,1	11,8
	1	37,5	41,5	10,7	10,67	72,0	7,7
	4	142,0	153,0	7,7	7,77	169,3	13,2
		143,6	154,8	7,8		169,7	13,2
	6,3	144,1	153,7	6,7	6,74	146,3	9,9
		143,8	153,6	6,8		145,9	9,8
	8	144,9	154,1	6,3	6,03	243,5	14,7
		145,2	153,5	5,7		243,6	14,7
2	<1	10,9	18,1	66,1	66,06	51,0	33,7
	1	7,2	7,9	9,7	9,72	66,4	6,5
	4	143,1	154,6	8,0	7,88	96,8	7,6
		143,8	154,9	7,7		96,6	7,6
	6,3	142,4	151,2	6,2	6,31	122,1	7,7
		144,5	153,8	6,4		121,9	7,7
	8	145,1	154,8	6,7	6,79	161,7	11,0
		143,6	153,5	6,9		166,0	11,3
Polvo de corte	<0.063	133,4	162,6	21,9	22,41	250,0	56,0
		120,4	148,0	22,9		250,4	56,1

Tabla 4.1 Absorción de las muestras de ensayo y cálculo del agua necesaria para carbonatación

Inconvenientes y causa de dispersión: poca cantidad de muestra para retirar una fracción cuantitativa para el ensayo de absorción.

4.3 RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

Los resultados obtenidos en la difracción de rayos X ayudan a complementar los valores obtenidos en la termogravimetría. Mediante la evaluación cualitativa de los valores obtenidos se han detectado las fases que han carbonatado después de estar tres días en una atmosfera controlada de CO₂. Al saber qué fase se han precipitado a carbonato de calcio al reaccionar con el dióxido de carbono, se ha podido hallar las fases que carbonatan aparte de la portlandita, ya que con el ensayo de termogravimetría no se puede detectar las fases iniciales antes de la carbonatación.

Evaluados los difractogramas, se representan, en la siguiente tabla, la intensidad de cada fase antes y después de la carbonatación, para así comparar qué fases aparecen después. Los difractogramas de los dos tipos de hormigón de planta prefabricada son similares, al ser de misma composición se generan valores idénticos por lo que solo se presentan las intensidades de fase por granulometría. El estudio de los difractogramas obtenidos se centró en los picos correspondientes a la portlandita, al cemento sin hidratar y a las fases carbonatadas; calcita,

dolomita y ankerita. La formación de estas fases después de la carbonatación acelerada indica que estas están carbonatando aparte de la portlandita. También es importante destacar que en los difractogramas se han obtenidos valores resaltables cemento sin hidratar en las muestras originales, esto indica que una parte del cemento no ha llegado a hidratarse durante el fraguado y es susceptible a absorber dióxido de carbono durante la experimentación. La siguiente tabla muestra las intensidades de las distintas fases obtenidas antes y después de la experimentación.

	Portlandita	Calcita	Cuarzo	Sílice	Cemento sin hidratar	Ankerita	Dolomita
PC inicial	-	mayoritaria	minoritaria	-	-	-	-
PC final	-	mayoritaria	-	minoritaria	-	minoritaria	-
<1 mm. inicial	intermedia	mayoritaria	mayoritaria	-	intermedia	-	-
<1 mm. final	-	mayoritaria	mayoritaria	-	intermedia	-	intermedia
1 mm. inicial	intermedia	mayoritaria	mayoritaria	-	intermedia	-	-
1 mm. final	intermedia	mayoritaria	mayoritaria	-	-	-	minoritaria
4 mm. inicial	intermedia	mayoritaria	mayoritaria	-	intermedia	-	-
4 mm. final	intermedia	mayoritaria	mayoritaria	-	intermedia	-	-
6.3 mm. inicial	intermedia	mayoritaria	mayoritaria	-	intermedia	-	-
6,3 mm. Final	intermedia	mayoritaria	mayoritaria	-	intermedia	-	-
8 mm. Inicial	intermedia	mayoritaria	mayoritaria	-	intermedia	-	-
8 mm. final	intermedia	mayoritaria	mayoritaria	-	intermedia	-	-

Tabla 4. 2 Evaluación difractogramas

De los datos adquiridos del análisis de difracción de rayos X se puede extraer qué transformaciones se han generado en el hormigón al haberlo sometido a carbonatación. Es destacable lo siguiente:

- En la muestra de polvo de corte se observa una porción minoritaria de cuarzo a la muestra inicial, la cual ya no aparece en el difractograma de después, debido a una posible carbonatación. También aparecen ankerita mineral del grupo carbonatado, el cual durante la carbonatación acelerada a reaccionado con el CO₂. El sílice que aparece en que aparece después de la carbonatación puede ser debido al cuarzo obtenido al difractograma del material original.
- Respecto a los datos obtenidos para la granulometría de hormigón triturado menor a 1 mm., aparecen valores intermedios de la dolomita, también mineral del grupo carbonatado que se forma por la carbonatación acelerada.
- En las muestras de granulometría de 1 mm al material carbonatado también aparece dolomita, su intensidad es minoritaria, pero esto refiere que la aparición es debido a la carbonatación.
- Para las otras granulometrías en los difractogramas no aparece ninguna variación. Se puede extraer que tanto la portlandita como el cemento sin hidratar, que aparecen con intensidad media, han sido reaccionadas con el dióxido de carbono ya que no se observa ninguna disminución de su intensidad como también ocurre en dos otras granulometrías menores.

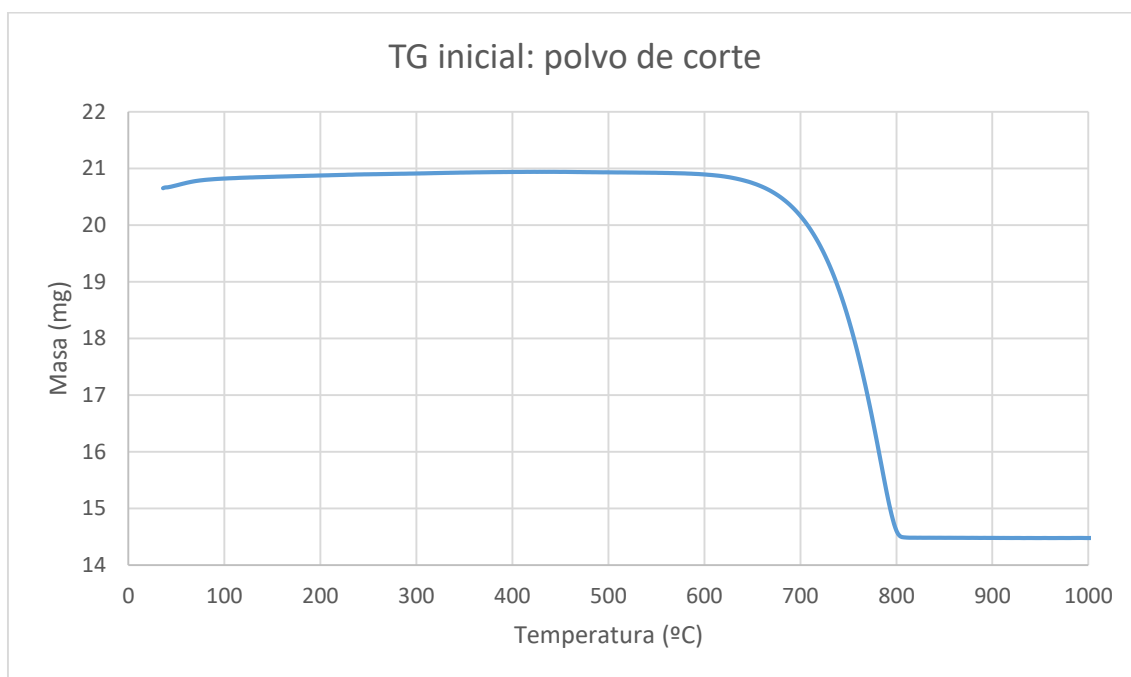
4.4 RESULTADOS TERMOGRAVIMETRÍA

A partir de los datos de los ensayos, se representaron las gráficas correspondientes de pérdida de peso en función de la temperatura. En la gráfica termogravimétrica (TG) en el eje X está representada la temperatura, y en el eje Y se corresponde a la masa. En ellas se puede identificar en el intervalo comprendido entre 440 °C y 580 °C una leve pérdida de masa producida por la descomposición de la Portlandita, el óxido de calcio se mantiene constante y la disminución de masa es debida a la evaporación del agua, $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. La segunda pérdida de masa característica será la vía de estudio de la absorción del dióxido de carbono. A partir de los 700 °C la calcita evapora el dióxido de carbono hasta los 1000 °C, con la siguiente reacción: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, esta evaporación se corresponde a una pérdida de masa de la muestra que queda registrada por las lecturas de la balanza. Mediante las pérdidas de masa producidas en los escalones citados, se han determinado las cantidades de portlandita y carbonato de calcio que contienen las muestras de hormigón.

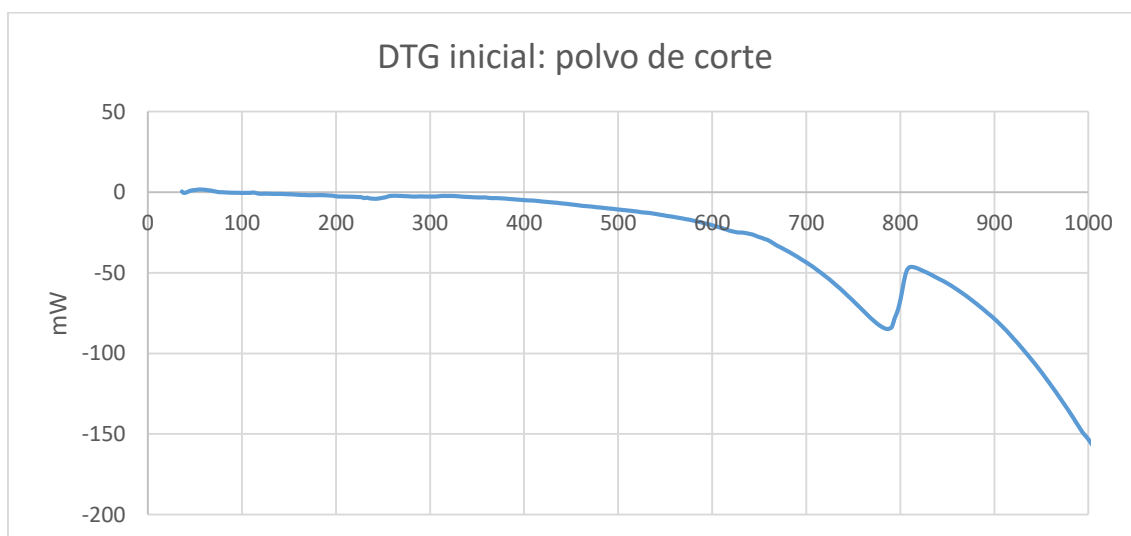
Para una determinación más precisas de los puntos de inicio y final de las variaciones de masas, se ha realizado la gráfica para cada una de las muestras correspondientes a la derivada de la curva de pérdida de masa porcentual (DTG). Se han realizado las gráficas a partir de los valores obtenidos en el análisis termogravimétrico. A continuación, se presentan y comentan las gráficas obtenidas para cada una de las muestras.

- Polvo de corte

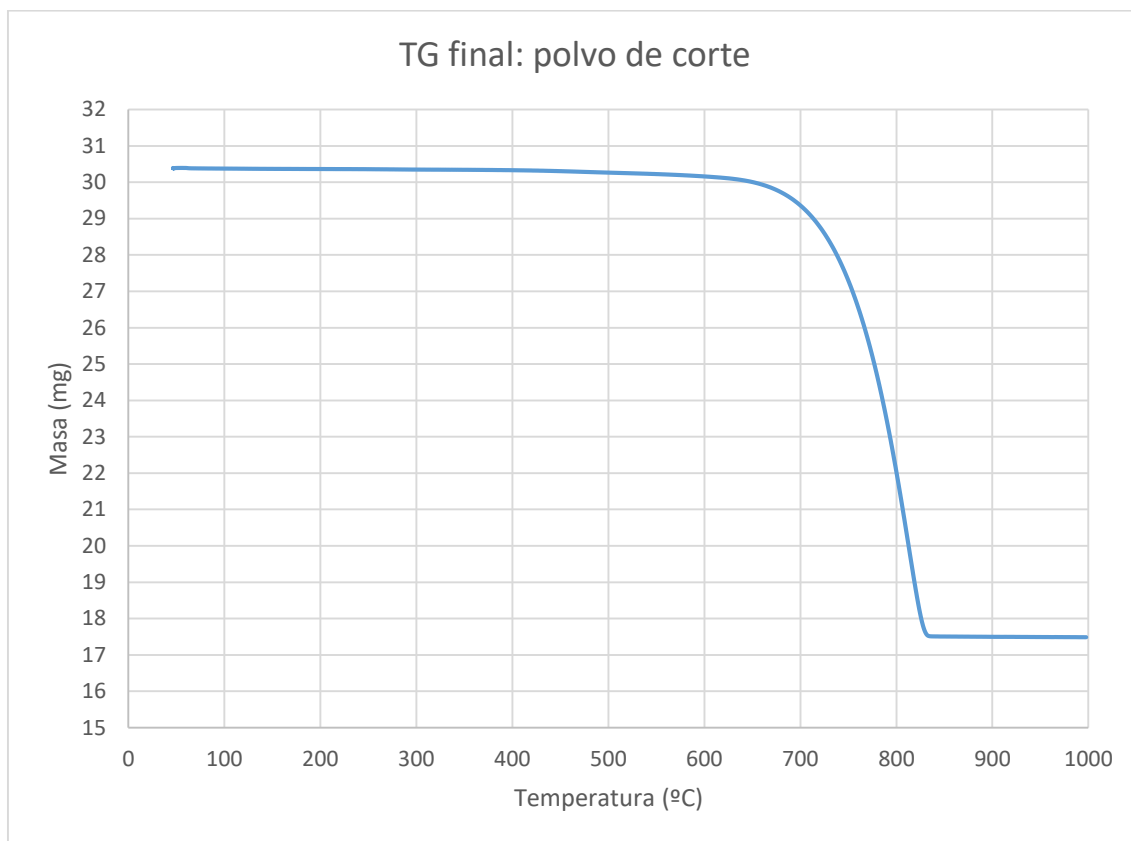
Los termogramas obtenidos del polvo de corte (Gráfica 4.1, Gráfica 4.2, Gráfica 4.3 y Gráfica 4.4) reflejan que la masa permanece constante hasta temperaturas mayores a los 650 °C, debido a su granulometría no experimentara ninguna pérdida de masa por deshidratación de fases hidratadas. Se detecta una disminución de la masa debido a la evaporación del dióxido de carbono que como se ha comentado anteriormente se inicia a los 700 °C como se pueden observar en los termogramas. La disminución se estabiliza a más temperatura en la muestra final debido a tener una mayor proporción de masa. Los picos alrededor de 800 °C en la gráfica de la derivada señalan el punto de temperatura que sufre una mayor evaporación de dióxido de carbono y como se ve en las gráficas DTG el pico de la muestra carbonatada es de mayor intensidad debido a tener una mayor cantidad de fase carbonatada.



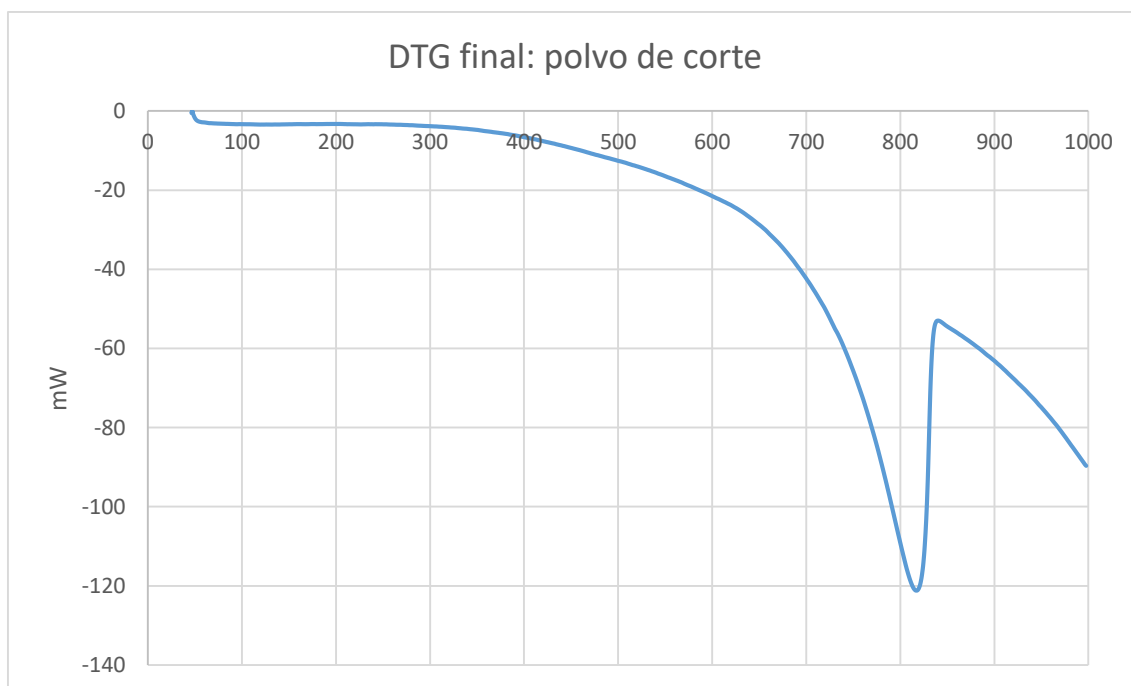
Gráfica 4.1 Curva termogravimétrica de la muestra de polvo de corte antes de ser expuesta al CO_2



Gráfica 4.2 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra de polvo de corte antes de ser expuesta al CO_2



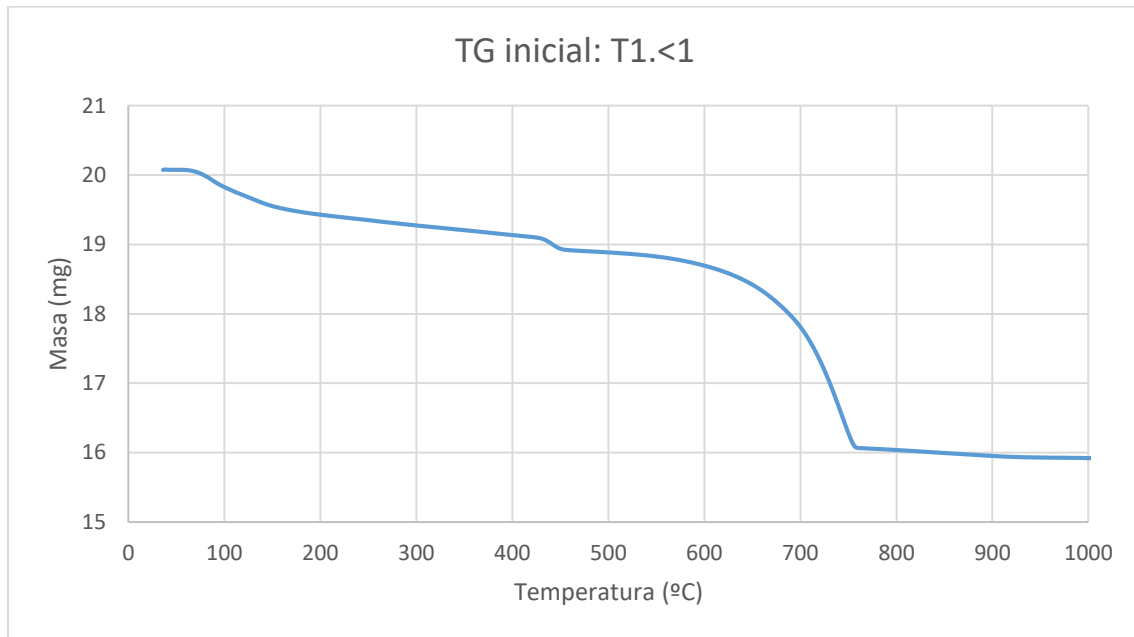
Gráfica 4.3 Curva termogravimétrica de la muestra de polvo de corte después de ser expuesta al CO_2



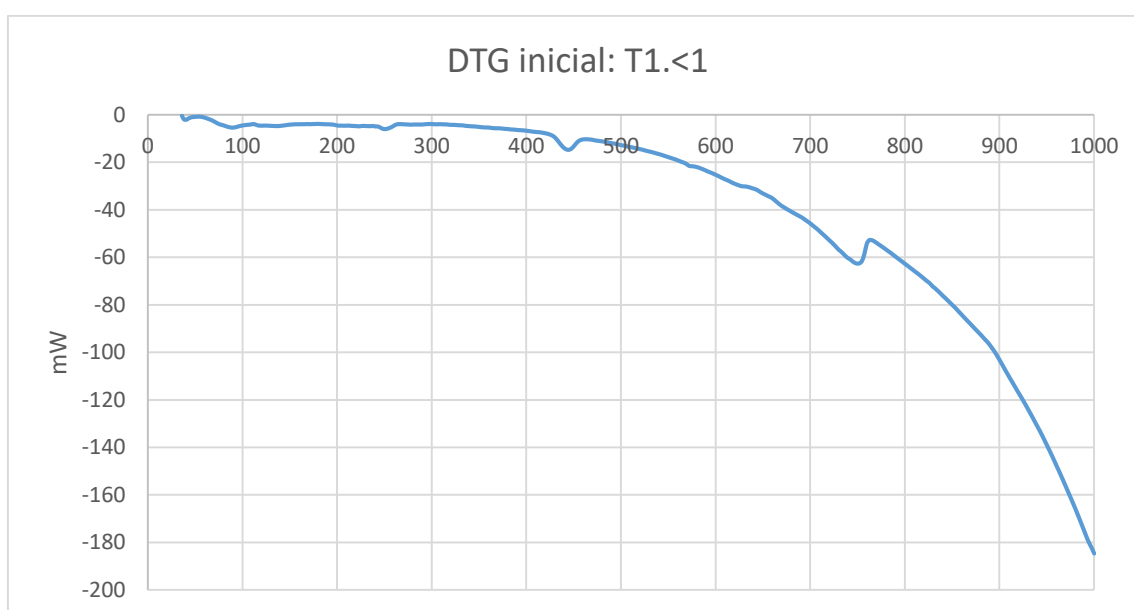
Gráfica 4.4 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra de polvo de corte después de ser expuesta al CO_2

- Tipo 1.<1

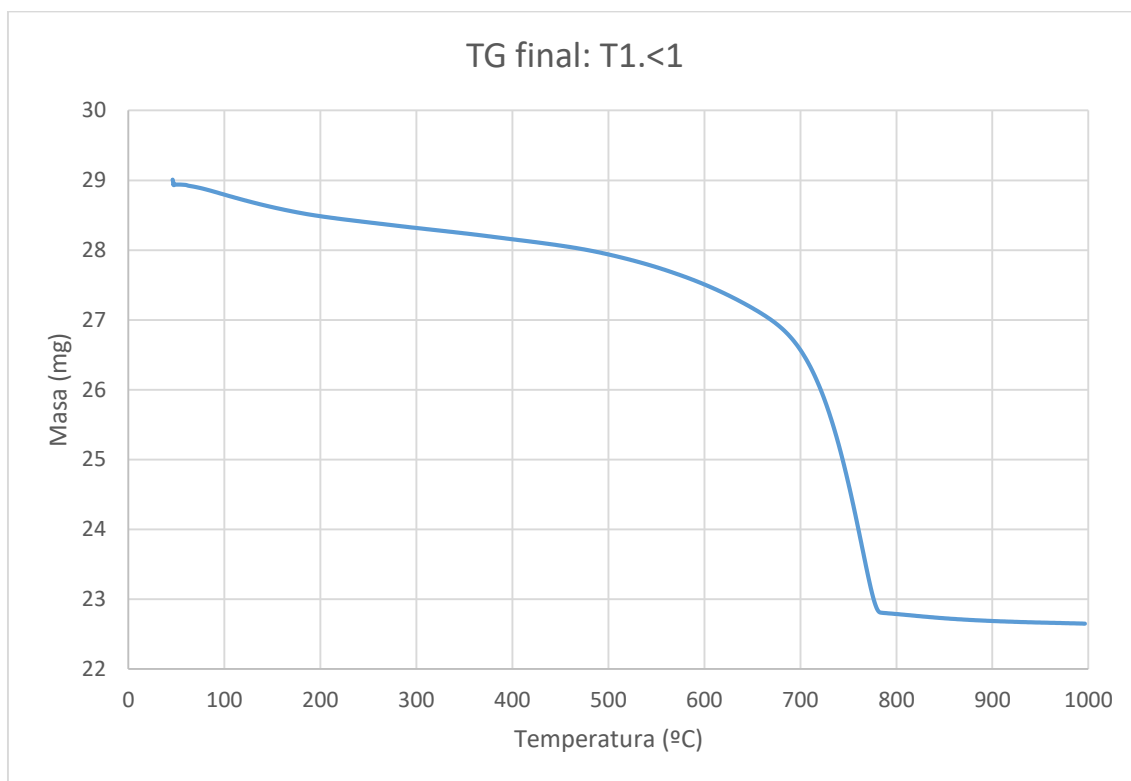
En los termogramas y curvas derivadas del tipo T1.<1 (Gráfica 4.5, Gráfica 4.6, Gráfica 4.7 y Gráfica 4.8) se observa, tanto antes y después, la pérdida de masa debido a la deshidratación de fases es leve. En las muestras de la precarbonatación se observa una leve pérdida alrededor de los 450 °C debido a la posible deshidratación de la portlandita que pudiera contener, pero por granulometría no se ha considerado la posibilidad de que contenga cal hidratada. En la fase de evaporación del dióxido de carbono, a partir de los 700 °C se observa la disminución de masa representada por la evaporación del dióxido de carbono, la cual parece más intensa en la muestra final al contener más cantidad de calcita.



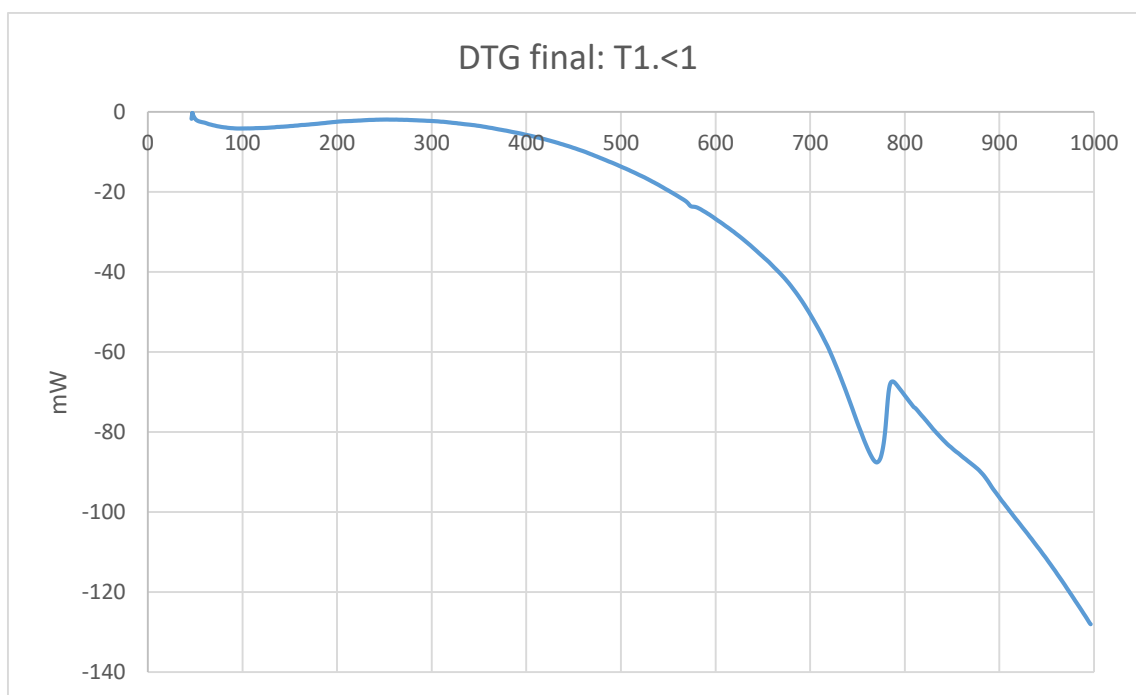
Gráfica 4.5 Curva termogravimétrica de la muestra T1.<1 antes de ser expuesta al CO₂



Gráfica 4.6 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.<1 antes de ser expuesta al CO₂



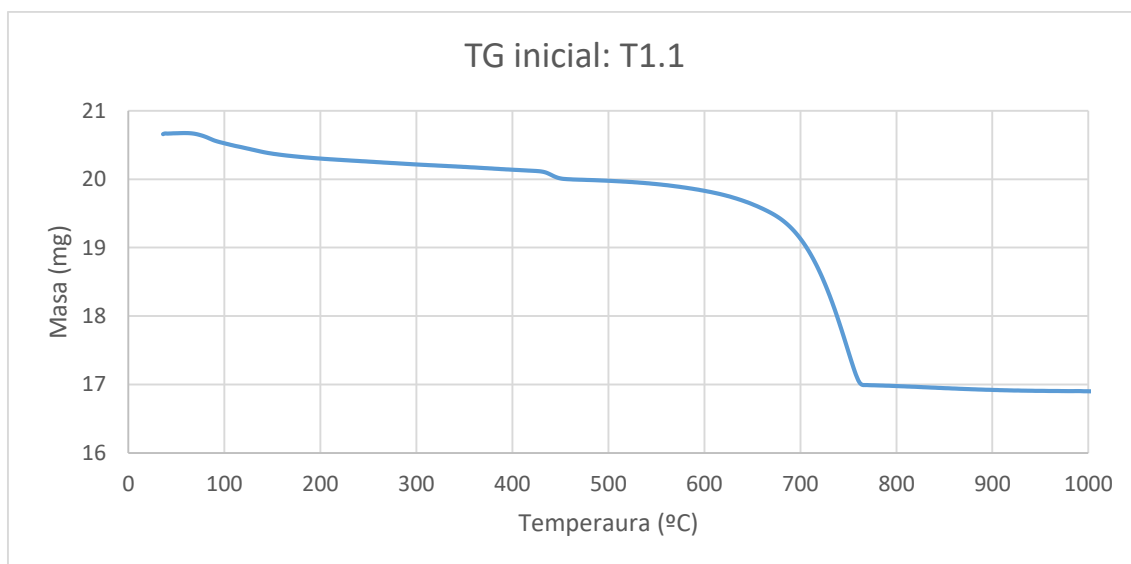
Gráfica 4.7 Curva termogravimétrica de la muestra T1.<1 después de ser expuesta al CO₂



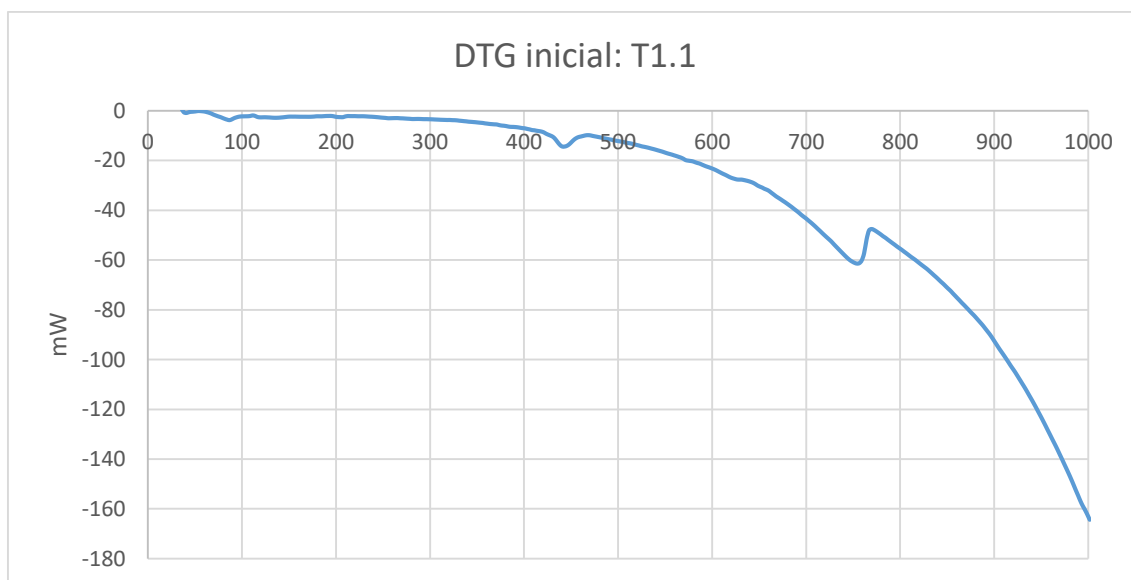
Gráfica 4.8 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.<1 después de ser expuesta al CO₂

- Tipo 1.1

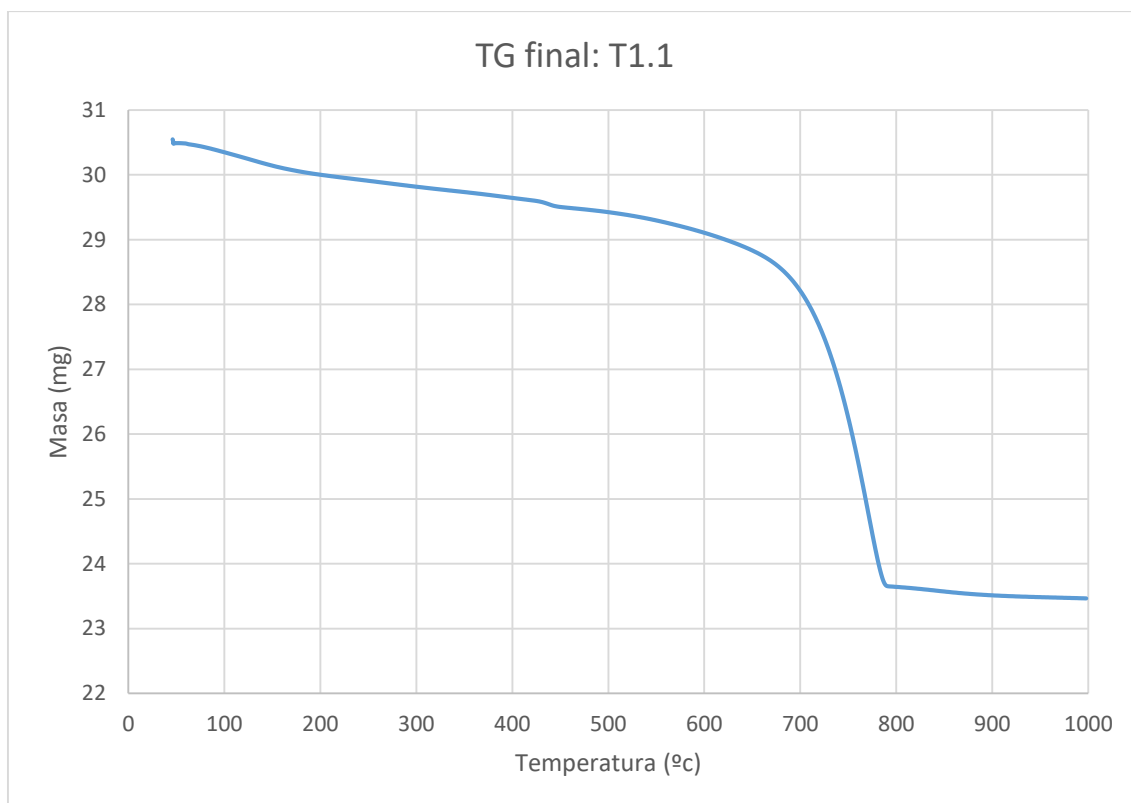
Los siguientes termogramas y curvas derivadas referentes del tipo T1.1 (Gráfica 4.9, Gráfica 4.10, Gráfica 4.11 y Gráfica 4.12) son parecidos a los comentados al tipo anterior comentado de granulometría menor de 1 mm. Es importante resaltar que el inicio decreciente más pronunciado entre temperatura ambiente y 100° C corresponde a la deshidratación debida a la humedad de la muestra y no representa una deshidratación de ninguna fase hidratada del hormigón.



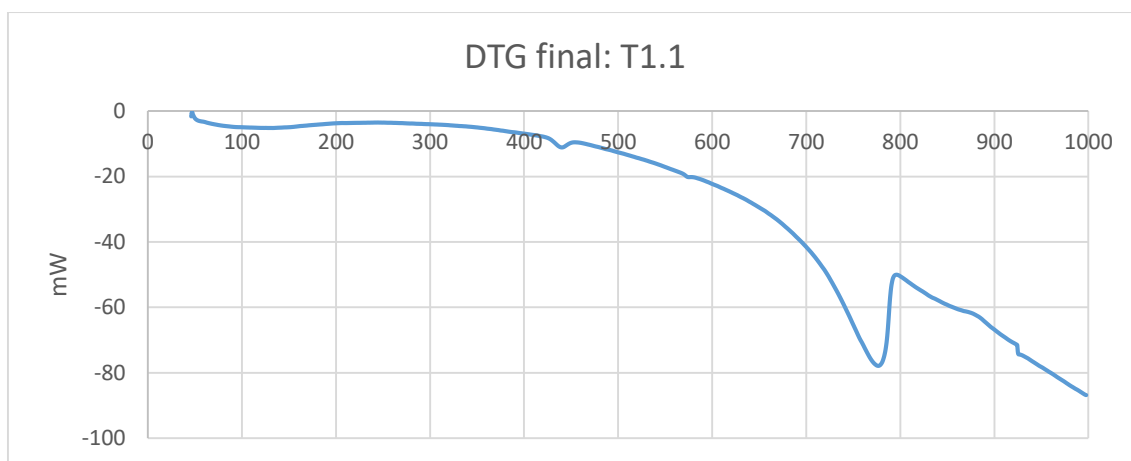
Gráfica 4.9 Curva termogravimétrica de la muestra T1.1 antes de ser expuesta al CO₂



Gráfica 4.10 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.1 antes de ser expuesta al CO₂



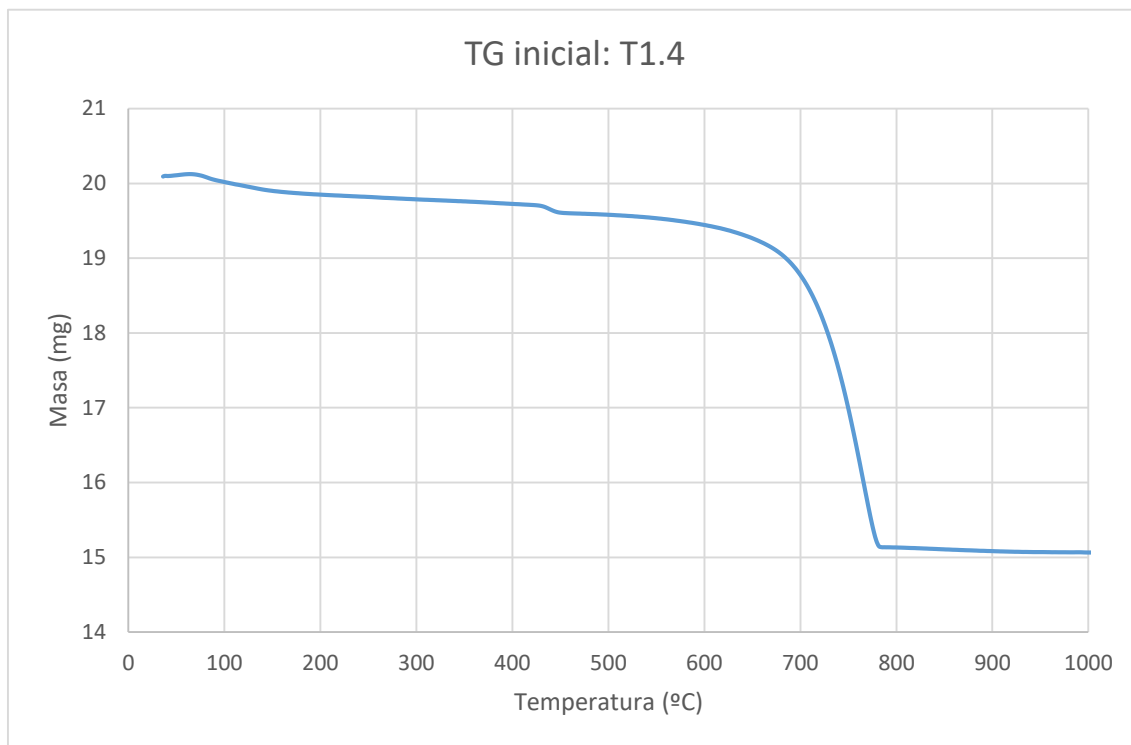
Gráfica 4.11 Curva termogravimétrica de la muestra T1.1 después de ser expuesta al CO_2



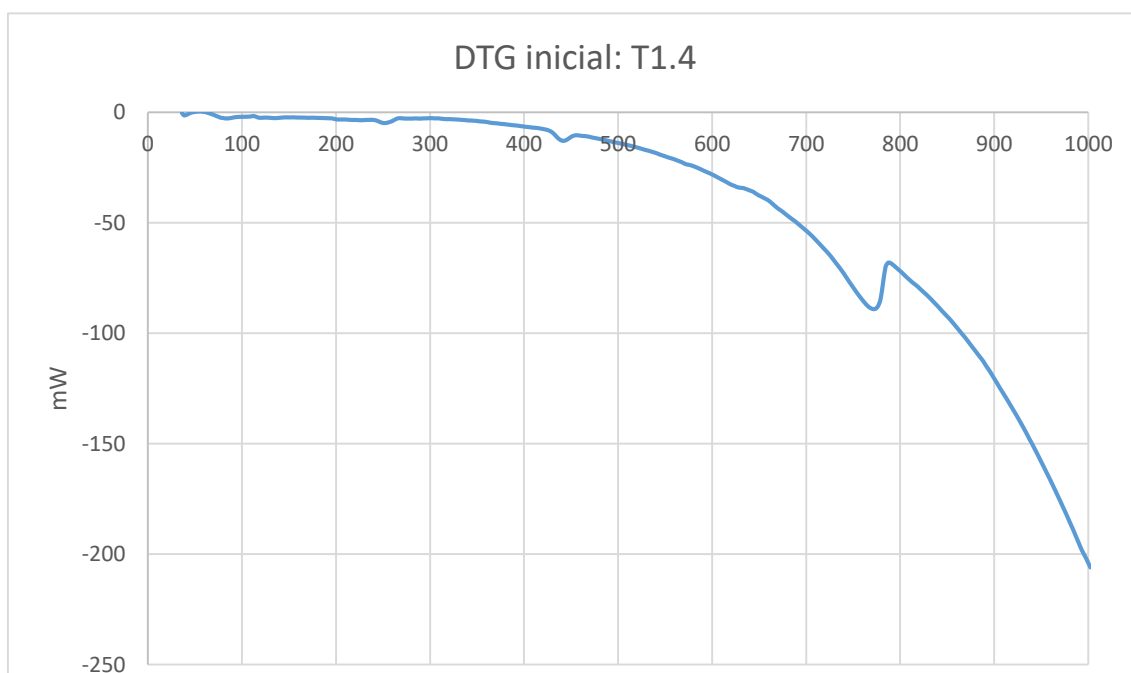
Gráfica 4.12 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.1 después de ser expuesta al CO_2

- Tipo 1.4

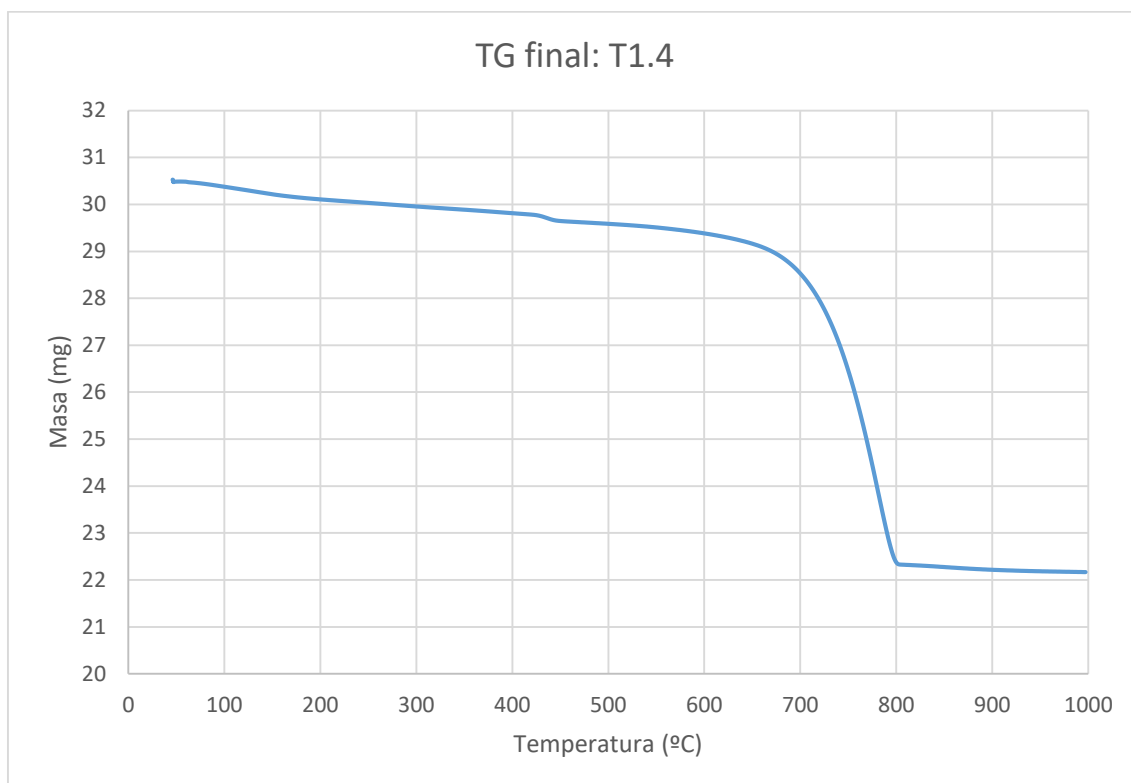
En los termogramas y curvas derivadas del tipo T1.4 (Gráfica 4.14, Gráfica 4.15, Gráfica 4.16 y Gráfica 4.17) se observa una leve pérdida de masa por la evaporación del agua, entre 440-580 °C la cual es referente a la deshidratación de la portlandita. En este tipo también presenta tener una fracción pequeña de portlandita. La cantidad de carbonato de calcio será necesaria calcularla para ver cuantos moles de más nos están reaccionando y corroborar absorción de dióxido de carbono.



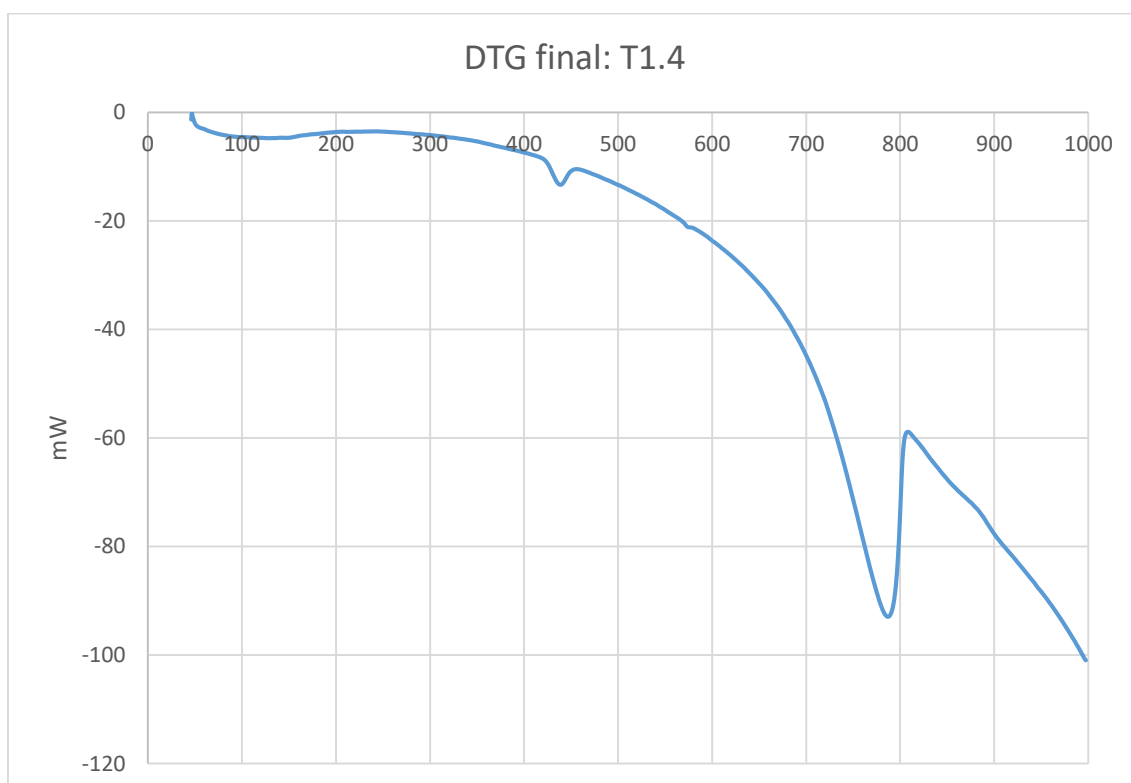
Gráfica 4.13 Curva termogravimétrica de la muestra T1.4 antes de ser expuesta al CO_2



Gráfica 4.14 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.4 antes de ser expuesta al CO_2



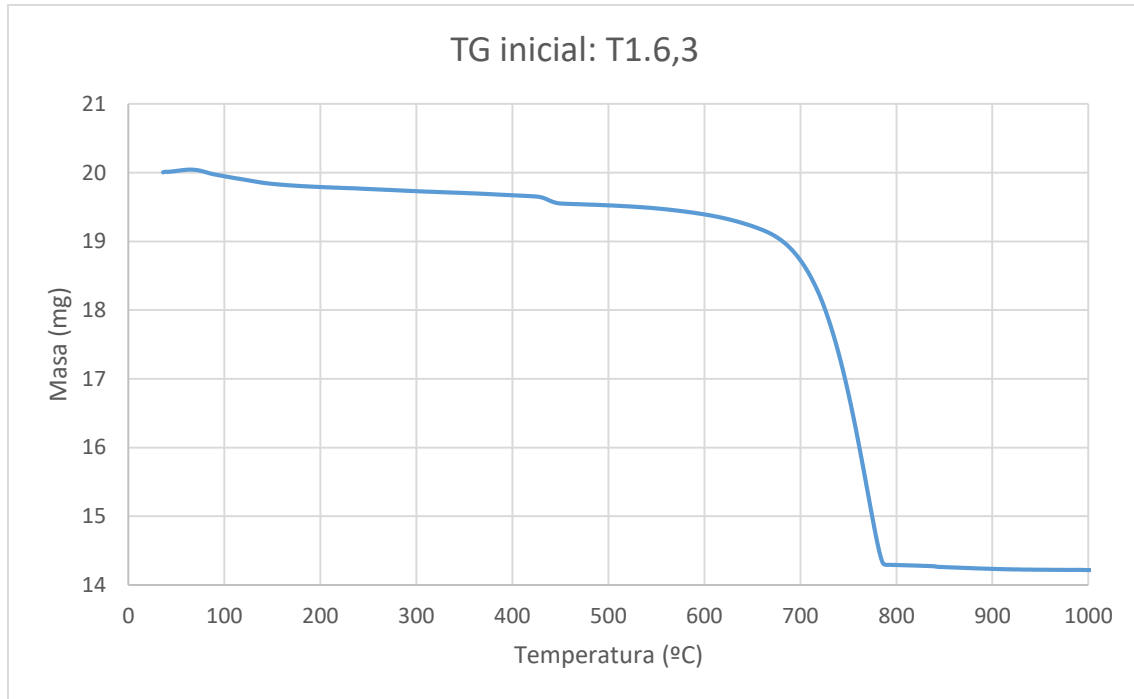
Gráfica 4.15 Curva termogravimétrica de la muestra T1.4 después de ser expuesta al CO_2



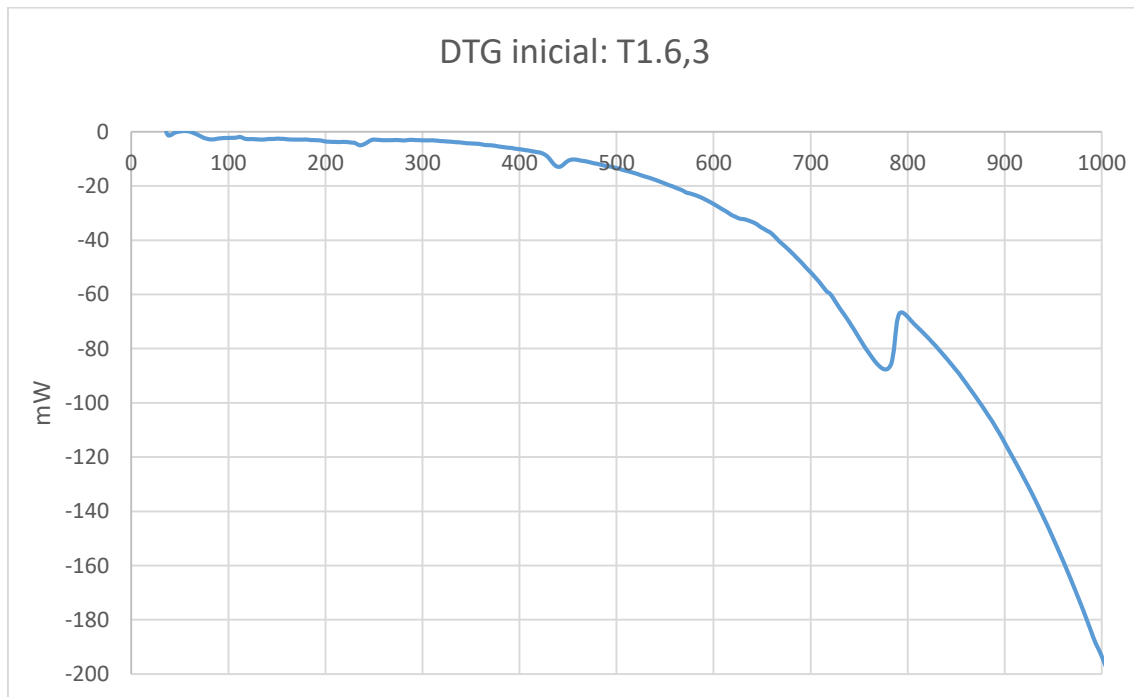
Gráfica 4.16 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.4 después de ser expuesta al CO_2

- Tipo 1.6,3

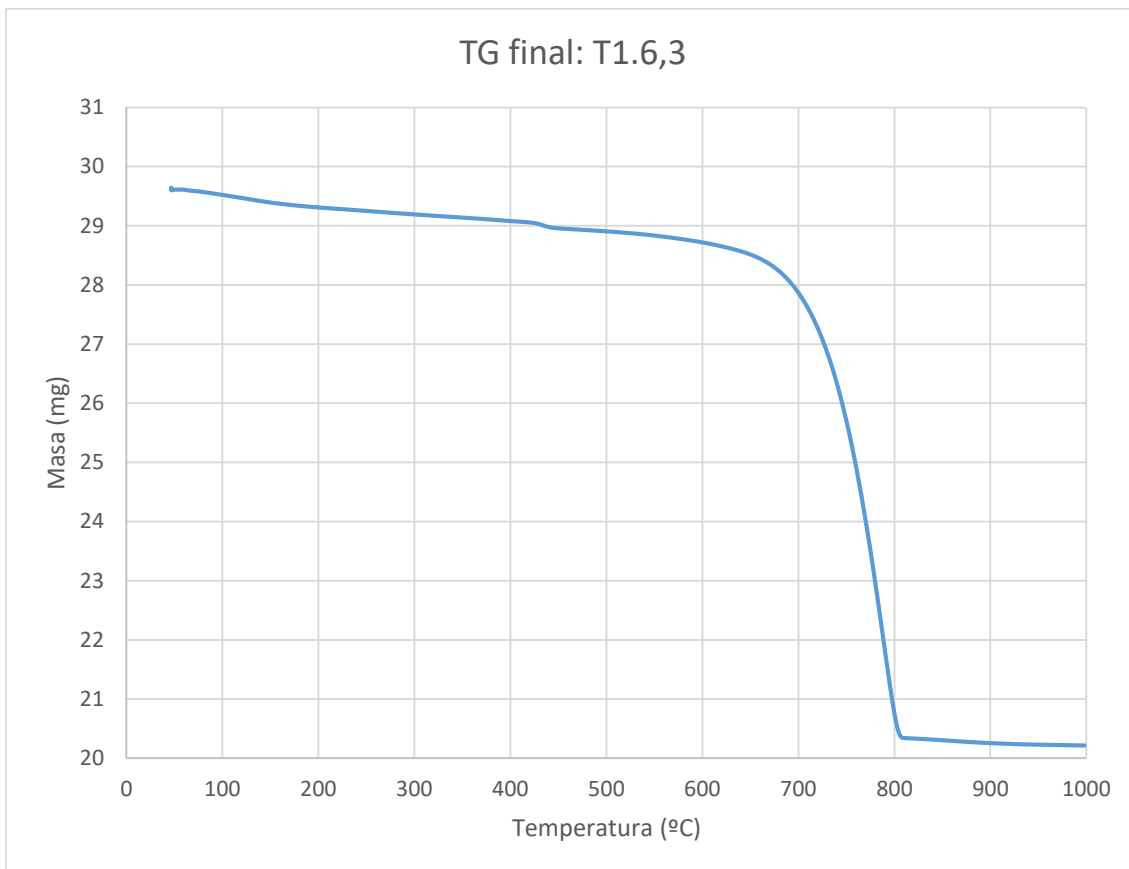
Resaltar de los siguientes termogramas y curvas derivadas del tipo T1.6,3 (Gráfica 4.17, Gráfica 4.18, Gráfica 4.19 y Gráfica 4.20) la simetría de las gráficas obtenidas antes y después de la carbonatación, será necesario calcular las pérdidas de moles entre escalones, para sacar un análisis de si ha aumentado el carbonato de calcio en la muestra ensayada en la autoclave.



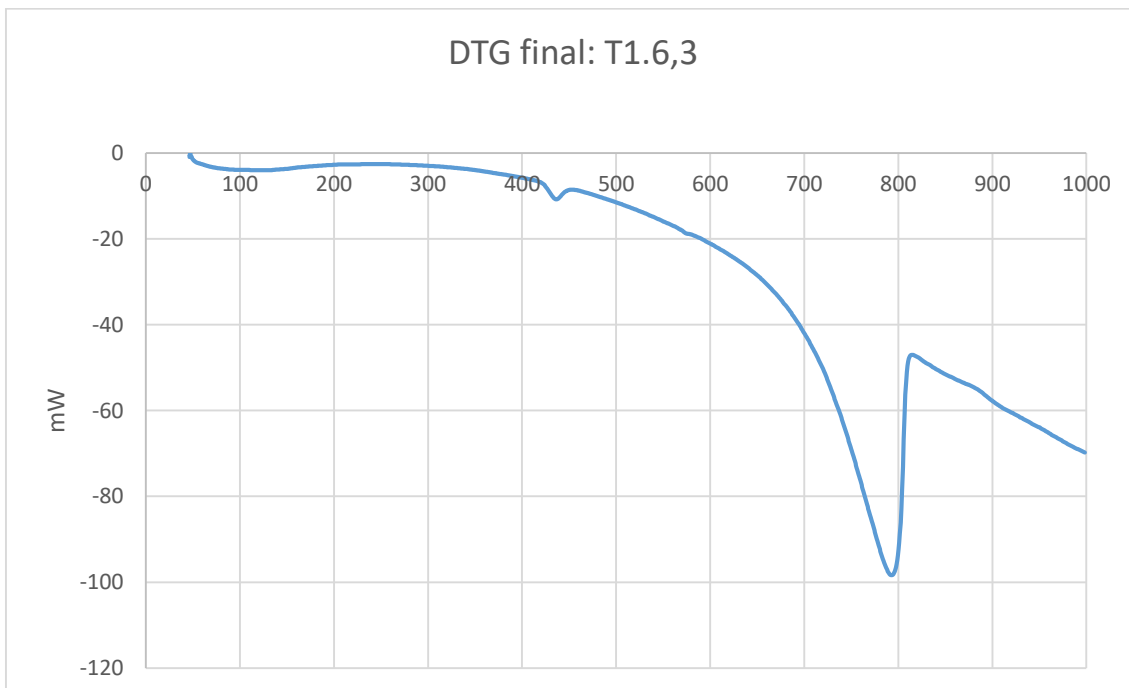
Gráfica 4.17 Curva termogravimétrica de la muestra de granulometría 6.3 mm antes de ser expuesta al CO_2



Gráfica 4.18 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra de granulometría 6.3 mm antes de ser expuesta al CO_2



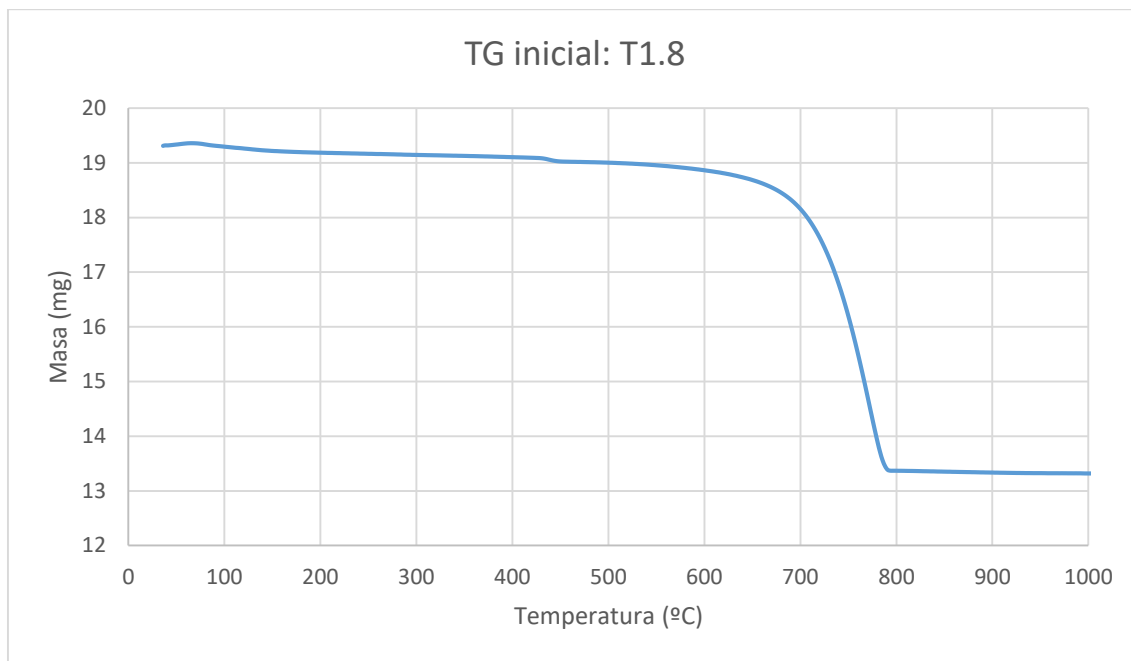
Gráfica 4.19 Curva termogravimétrica de la muestra de granulometría 6.3 mm después de ser expuesta al CO_2



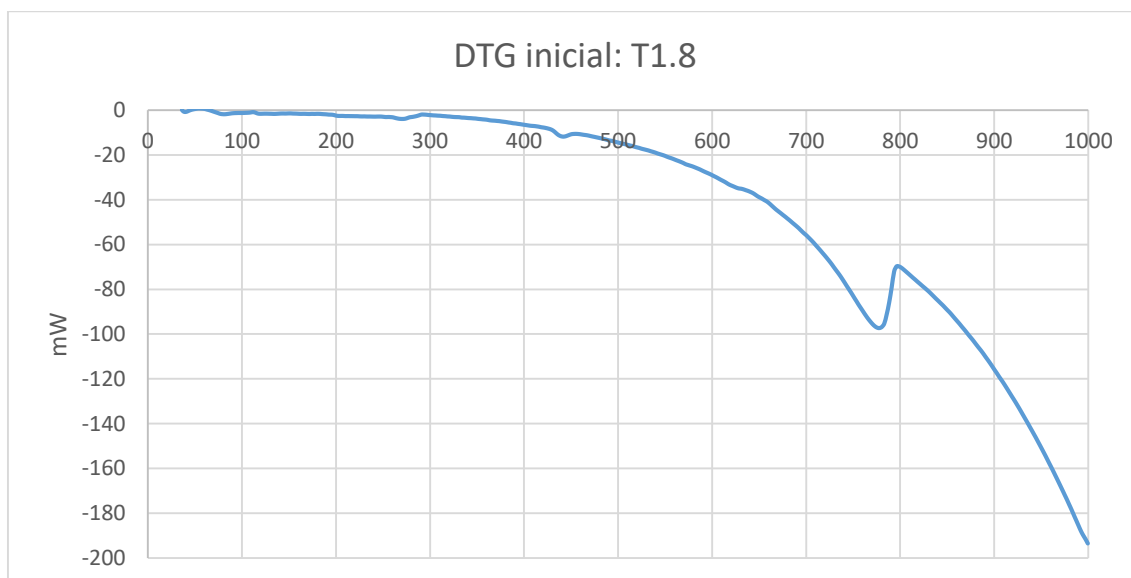
Gráfica 4.20 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra de granulometría 6.3 mm antes de ser expuesta al CO_2

- Tipo 1.8

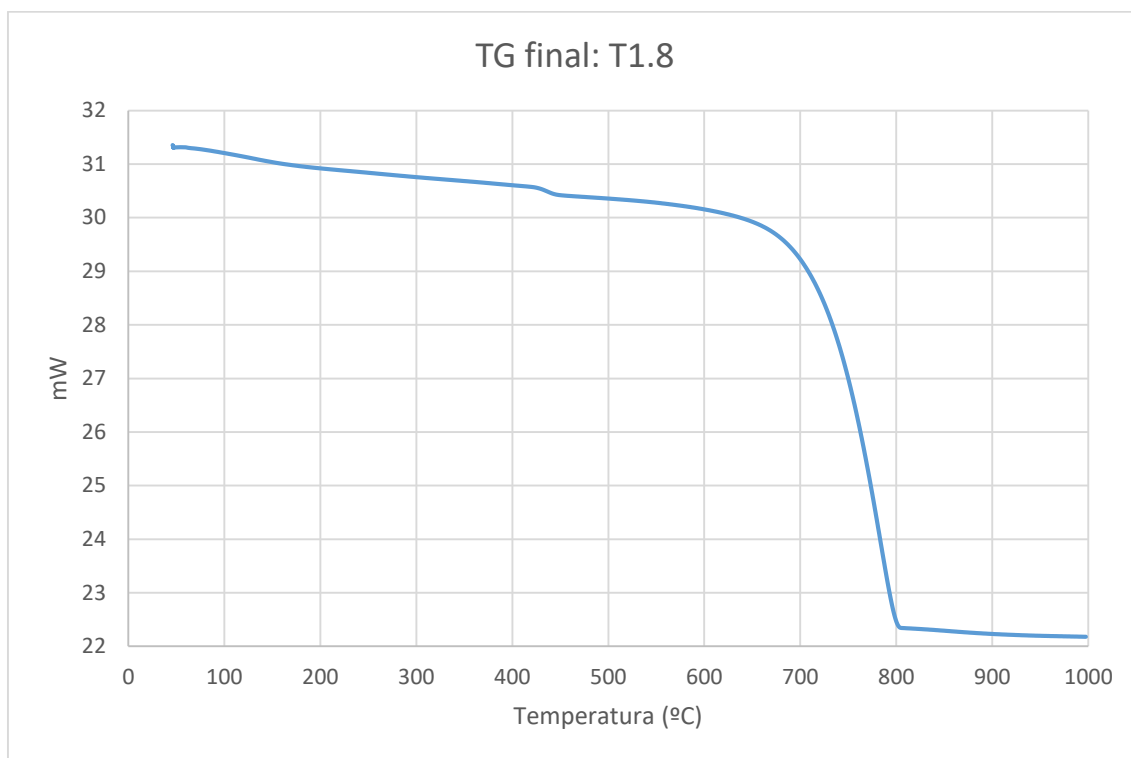
De los termogramas y curvas derivadas referentes al tipo T1.8 (Gráfica 4.21, Gráfica 4.22, Gráfica 4.23 y Gráfica 4.24) destacar que los valores de portlandita parecen mantenerse constantes a nivel gráfico, posteriormente en este trabajo se calculan los valores y se comparan las variaciones. Respecto a la calcita formada, será necesario una comparación a base de cálculo de moles para saber la posible absorción de dióxido de carbono de la muestra.



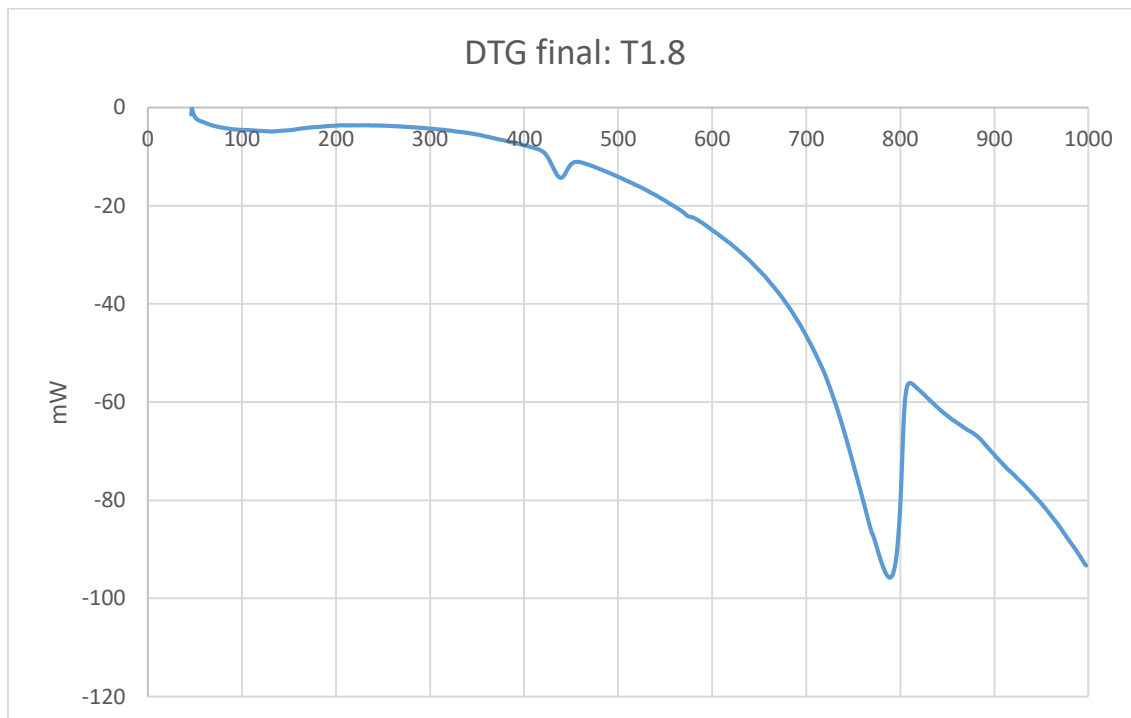
Gráfica 4.21 Curva termogravimétrica de la muestra T1.8 antes de ser expuesta al CO_2



Gráfica 4.22 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.8 antes de ser expuesta al CO_2



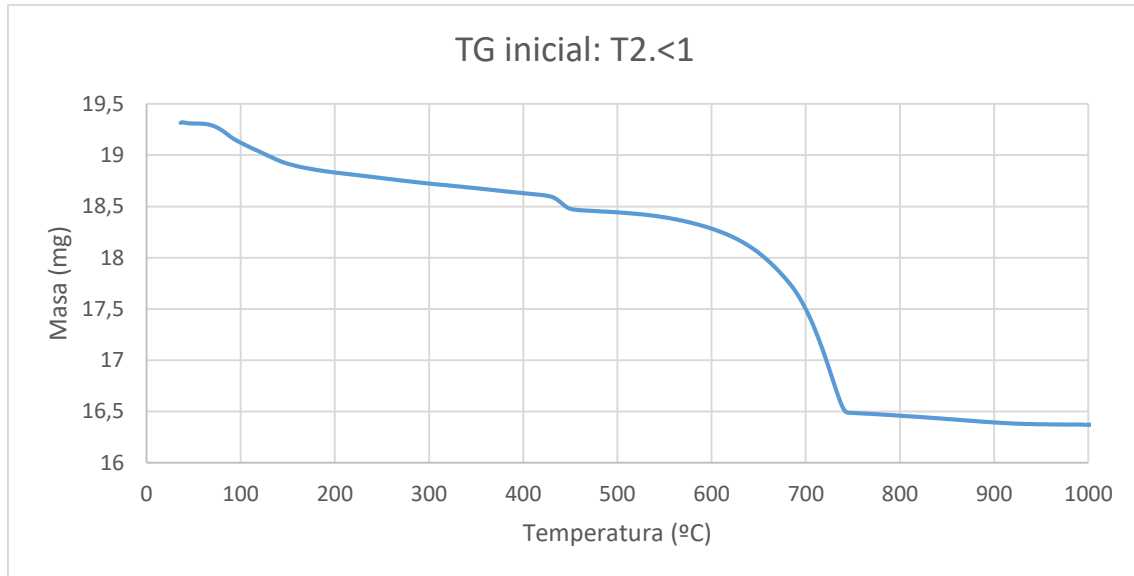
Gráfica 4.23 Curva termogravimétrica de la muestra T1.8 después de ser expuesta al CO_2



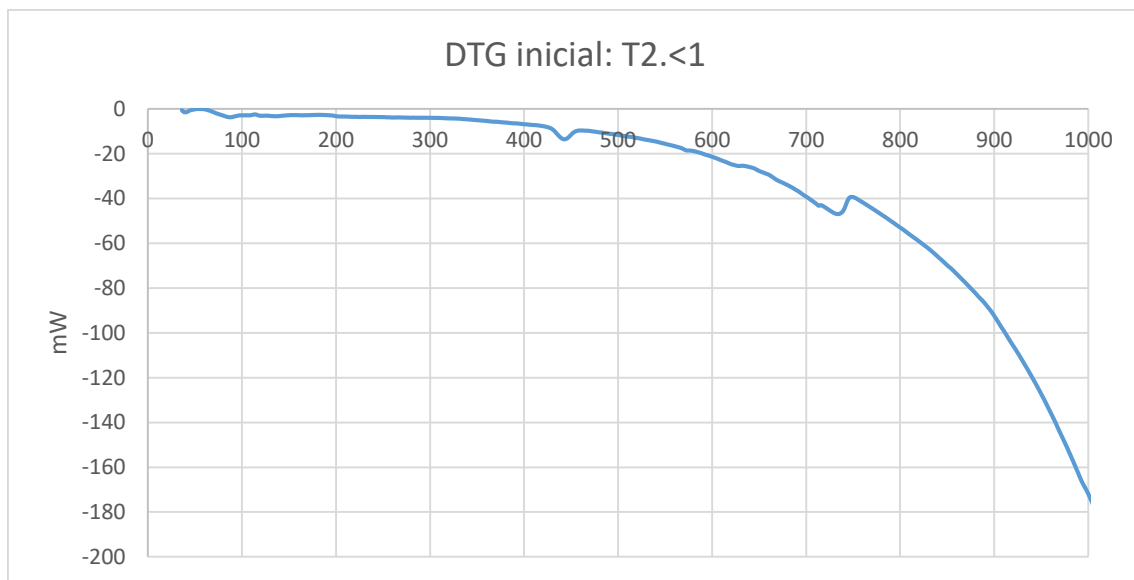
Gráfica 4.24 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T1.8 después de ser expuesta al CO_2

- Tipo 2.<1

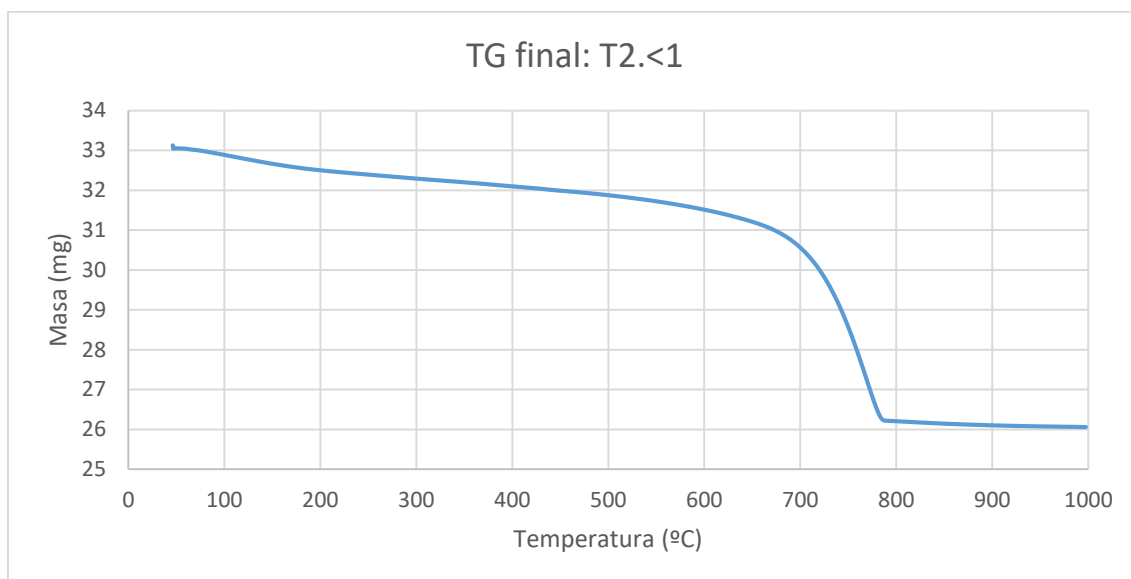
En los termogramas y curvas derivadas del tipo T2.<1 (Gráfica 4.25, Gráfica 4.26, Gráfica 4.27 y Gráfica 4.28) se observa, tanto antes y después, la pérdida de masa debido a la deshidratación de fases es leve como pasaba ya en el tipo T1 de la misma granulometría. La pérdida de masa será necesario evaluarla por moles perdidos para evaluar su absorción de CO₂.



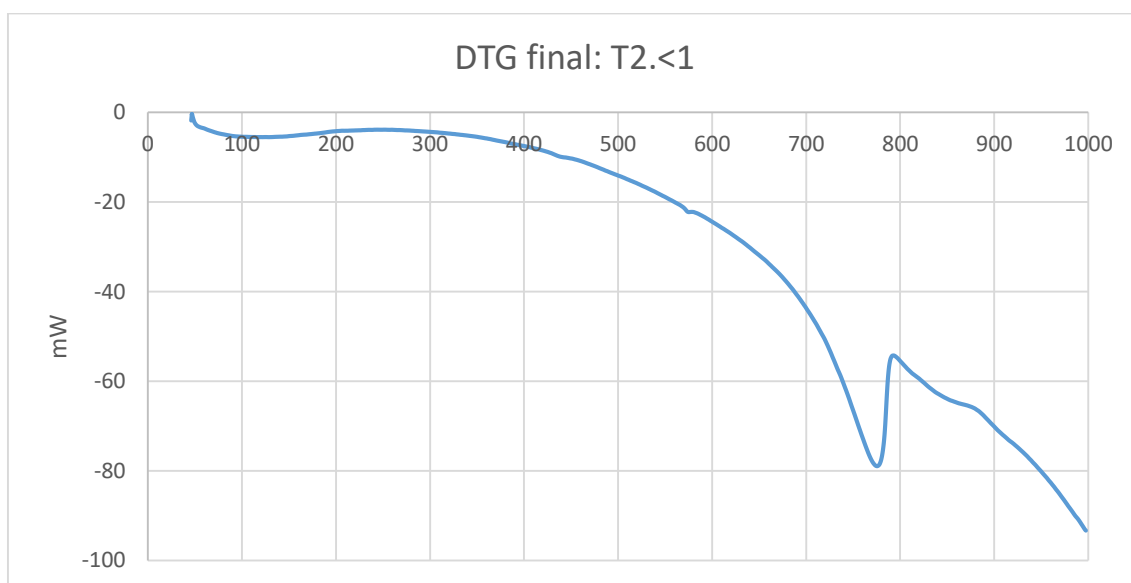
Gráfica 4.25 Curva termogravimétrica de la muestra T2.<1 antes de ser expuesta al CO₂



Gráfica 4.26 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.<1 antes de ser expuesta al CO₂



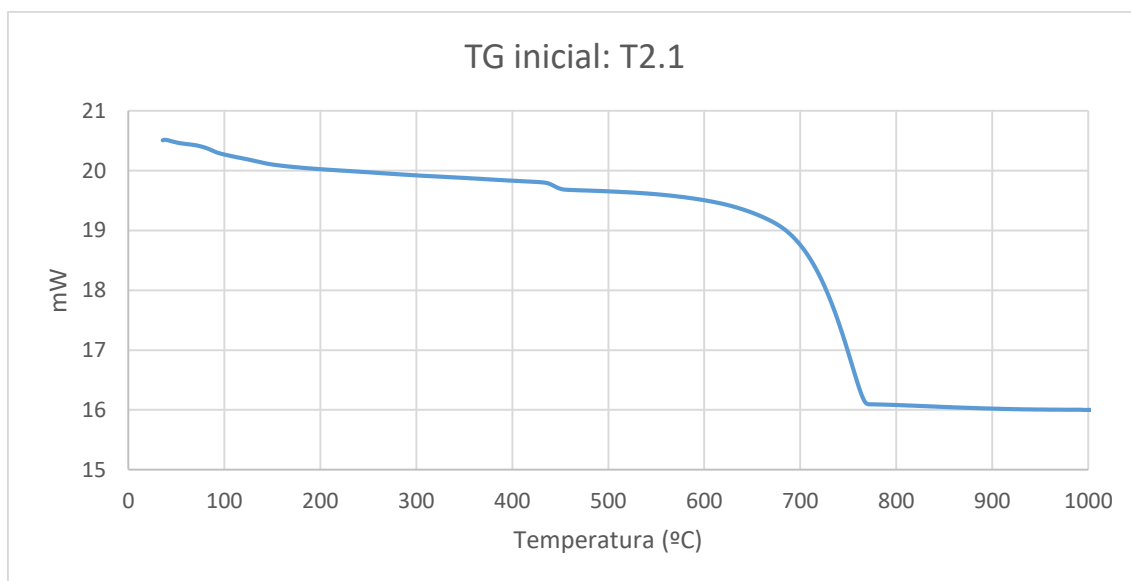
Gráfica 4.27 Curva termogravimétrica de la muestra T2.<1 después de ser expuesta al CO₂



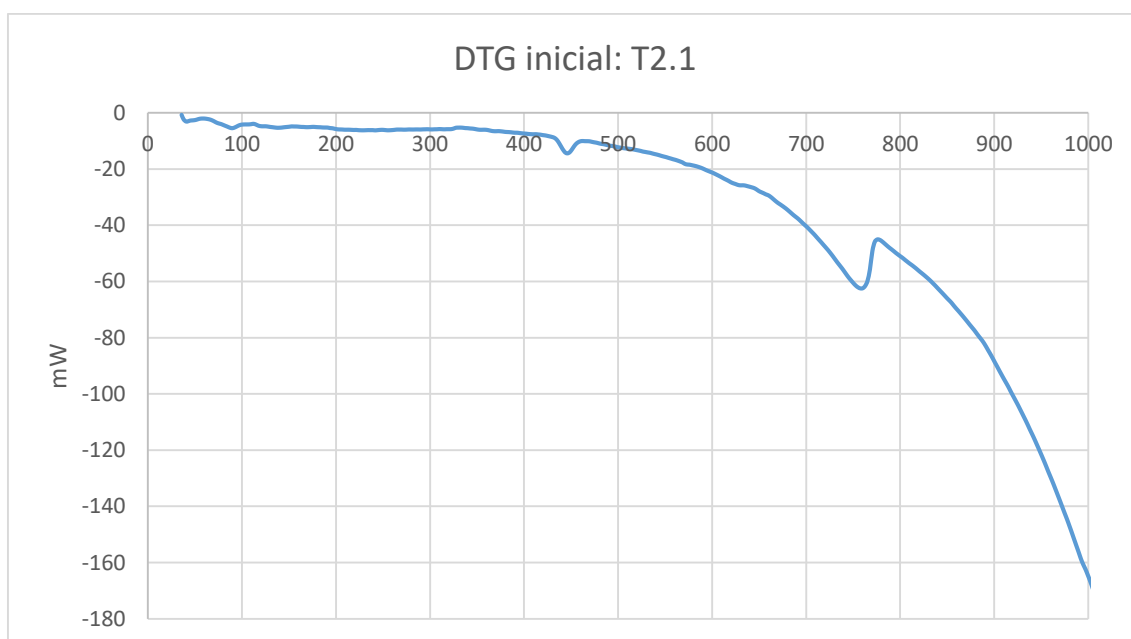
Gráfica 4.28 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.<1 después de ser expuesta al CO₂

- Tipo 2.1

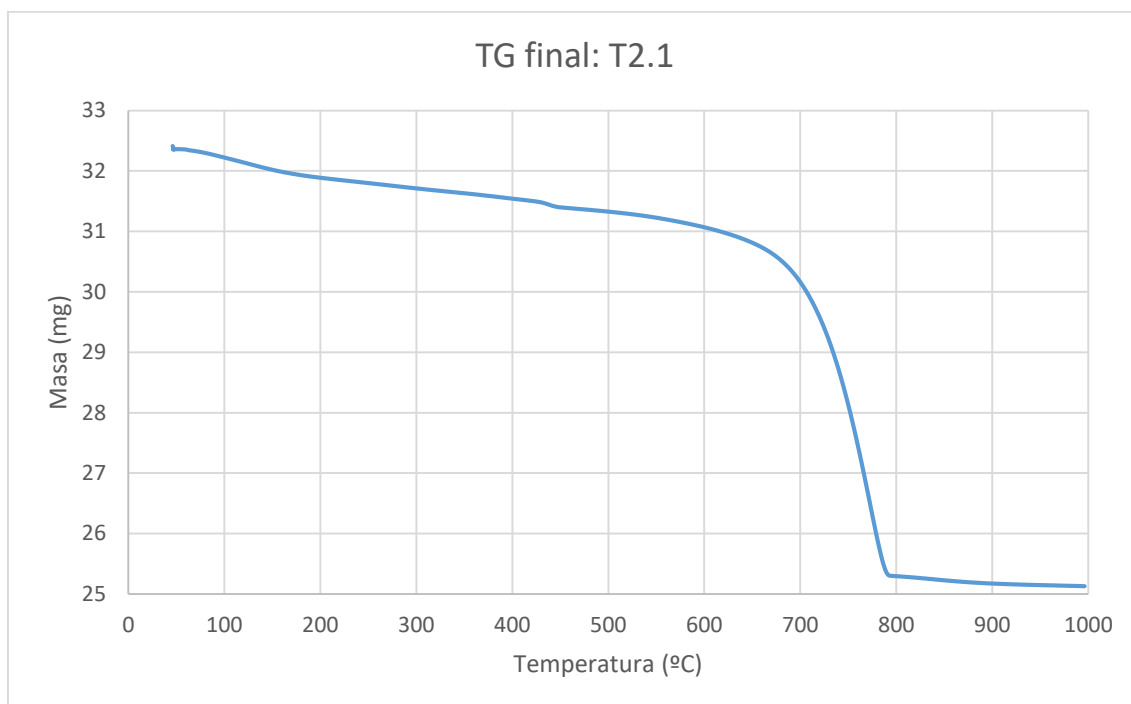
Los siguientes termogramas y curvas derivadas referentes del tipo T2.1 (Gráfica 4.29, Gráfica 4.30, Gráfica 4.31 y Gráfica 4.32) son parecidos a los obtenidos por el análisis termogravimétrico de la misma granulometría que este del tipo T1 como en el caso anterior. Se observa que, en diferencia a la muestra final, en la inicial se genera un pico de pérdida de masa alrededor de los 450 °C referente a la deshidratación de la portlandita. Al no aparecer un pico tan pronunciado en el segundo termograma puede indicar una posible carbonatación de la portlandita. También en este caso existe la necesidad de calcular pérdida de moles para evaluar la posible absorción de dióxido de carbono.



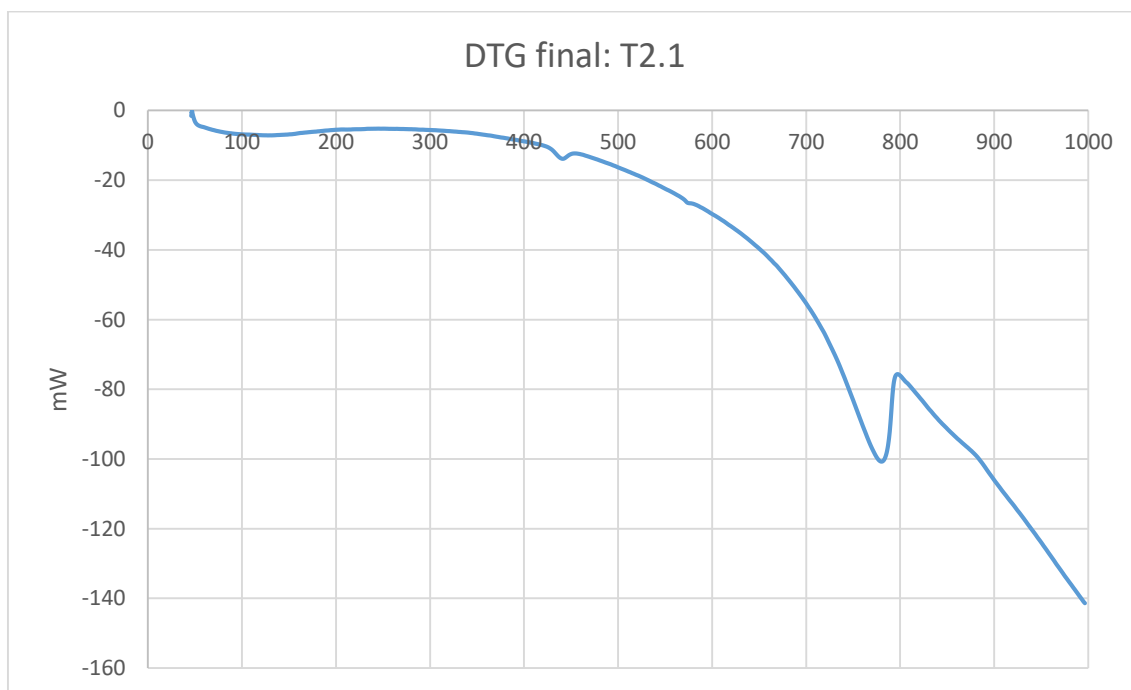
Gráfica 4.29 Curva termogravimétrica de la muestra T2.1 antes de ser expuesta al CO₂



Gráfica 4.30 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.1 antes de ser expuesta al CO₂



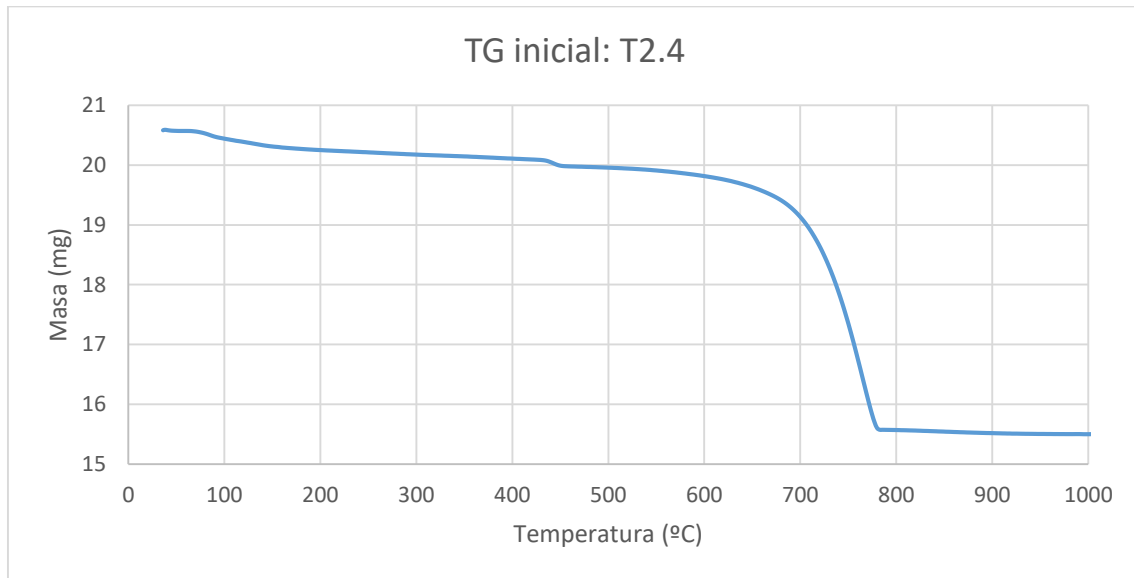
Gráfica 4.31 Curva termogravimétrica de la muestra T2.1 después de ser expuesta al CO_2



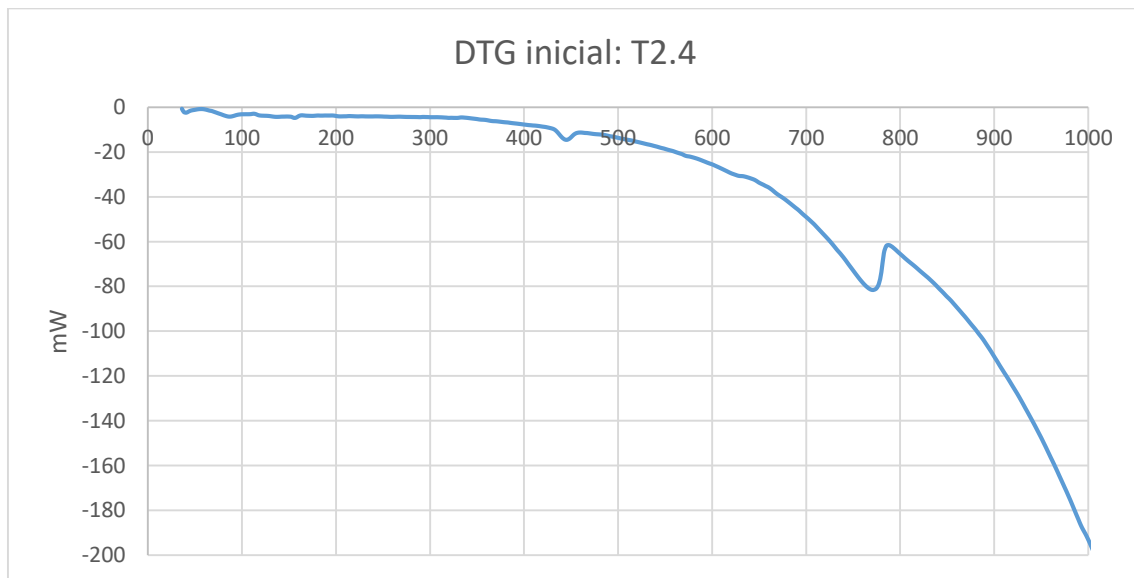
Gráfica 4.32 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.1 después de ser expuesta al CO_2

- Tipo 2.4

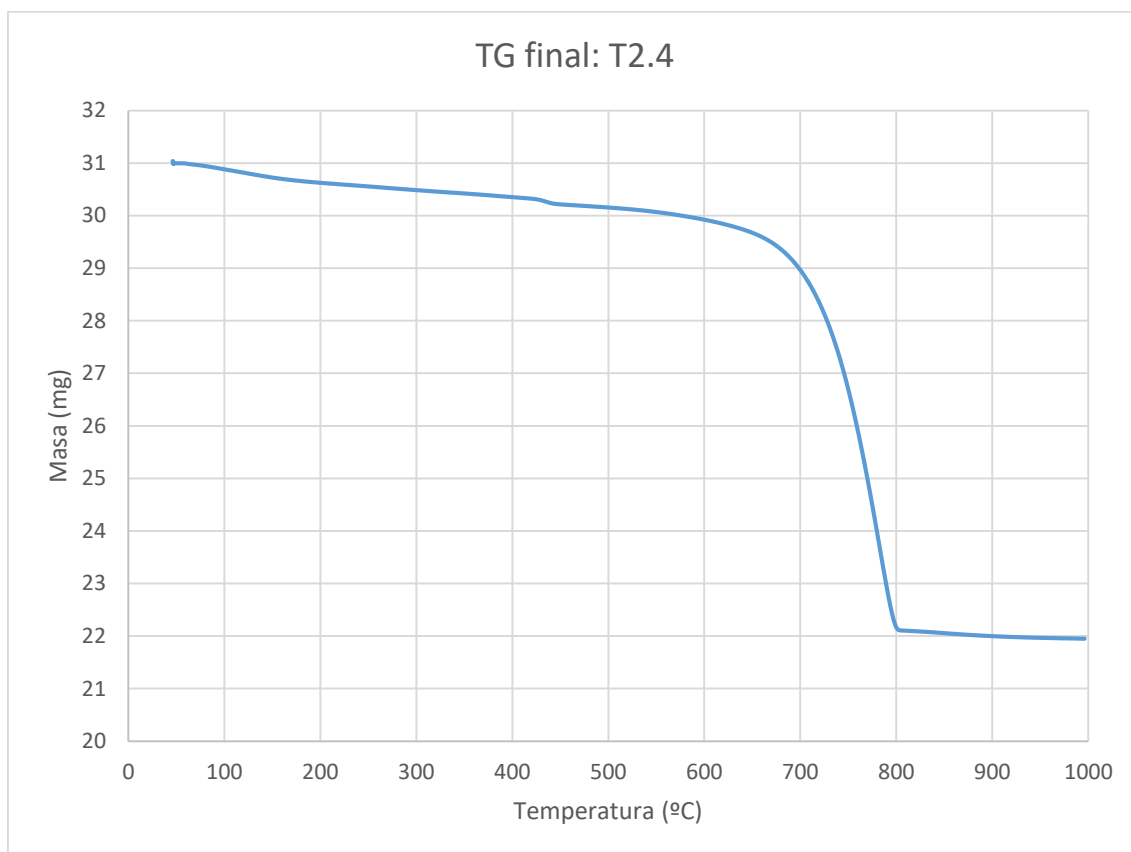
En los termogramas y curvas derivadas del tipo T2.4 (Gráfica 4.33, Gráfica 4.34 Gráfica 4.35 y Gráfica 4.36) también se observa una simetría entre graficas iniciales y finales por lo que será necesario evaluarlo mediante las pérdidas de masa entre rangos característicos.



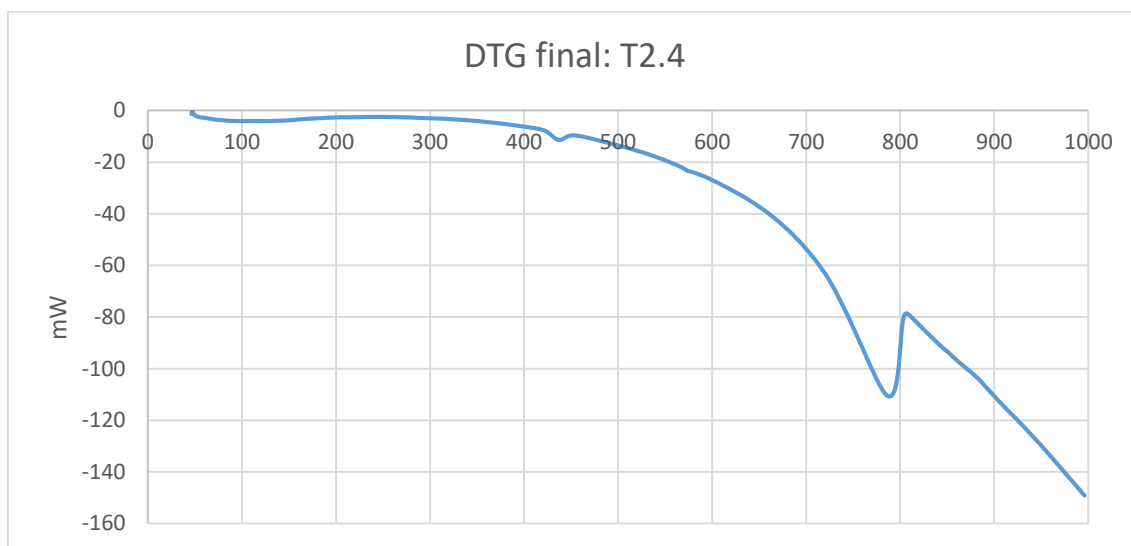
Gráfica 4.33 Curva termogravimétrica de la muestra T2.4 antes de ser expuesta al CO₂



Gráfica 4.34 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.4 antes de ser expuesta al CO₂



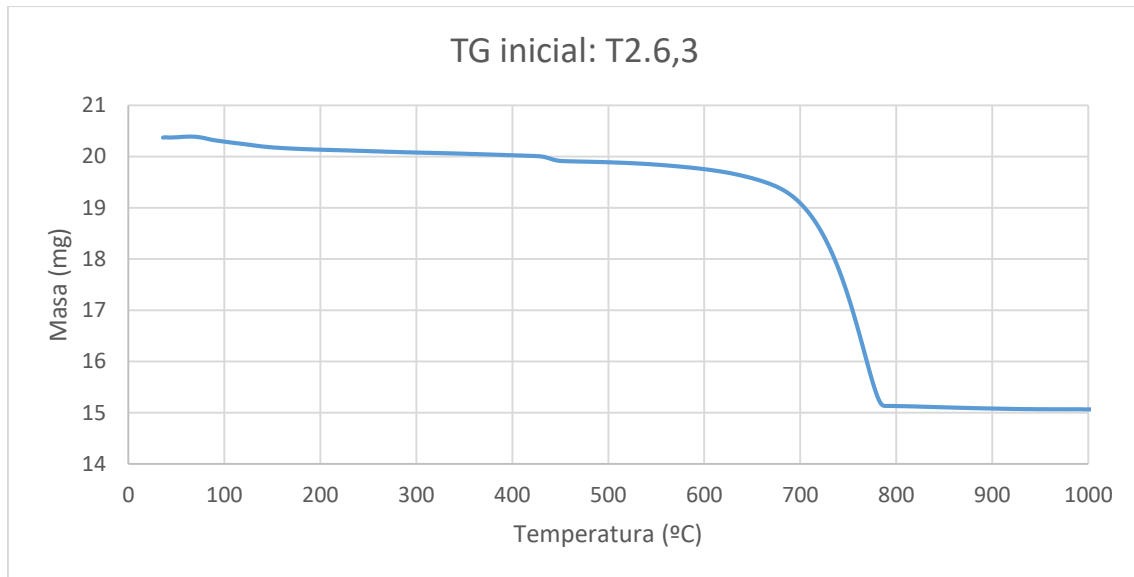
Gráfica 4.35 Curva termogravimétrica de la muestra T2.4 después de ser expuesta al CO_2



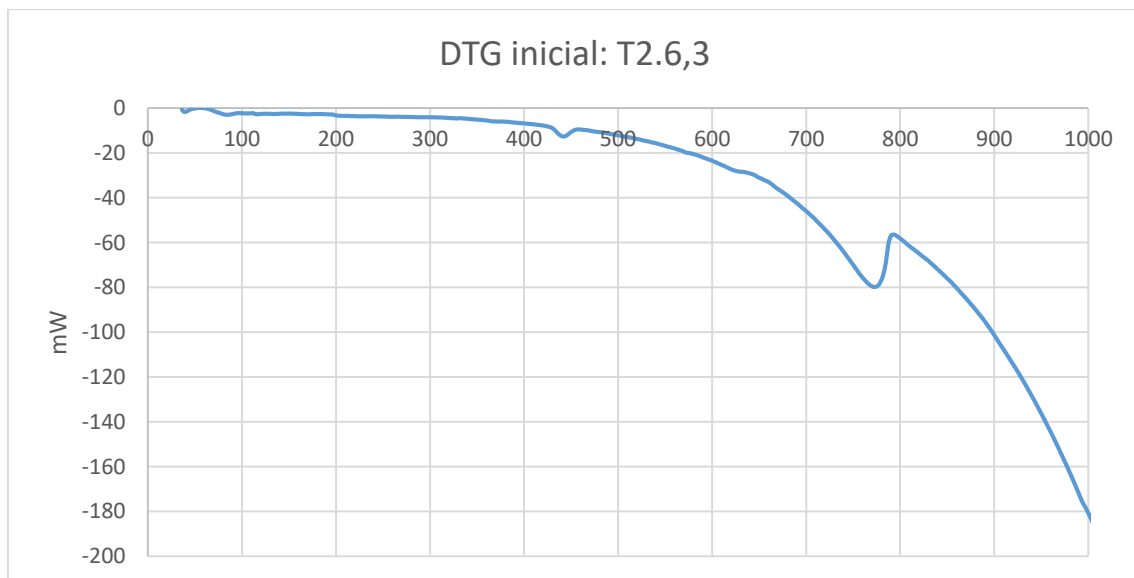
Gráfica 4.36 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.4 después de ser expuesta al CO_2

- Tipo 2.6,3

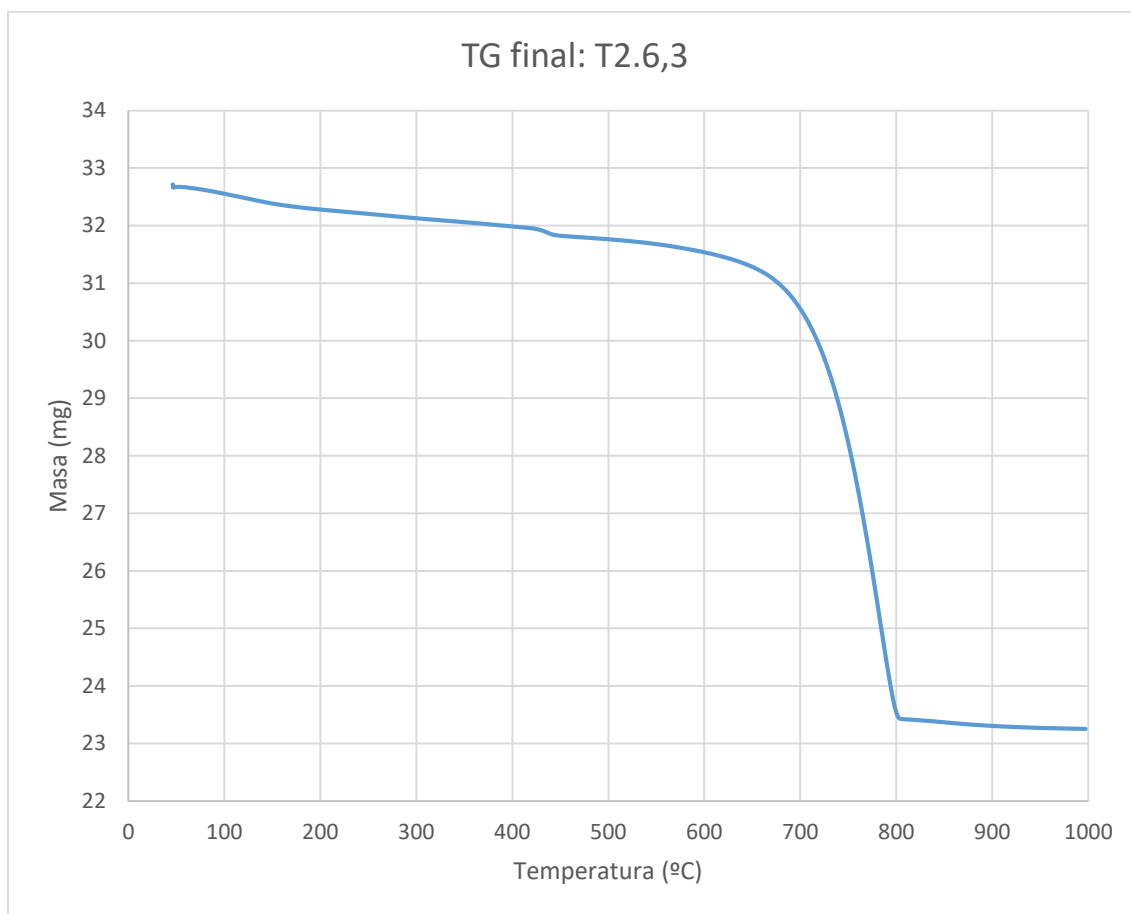
De los datos que se pueden extraer de los termogramas y las curvas derivadas del tipo T2.6,3 (Gráfica 4.37, Gráfica 4.38, Gráfica 4.39 y Gráfica 4.40), resaltar un pico mayor de pérdida de masa de la muestra final, respecto a la inicial. Este pico producido alrededor de los 750 °C es debido a la evaporación de dióxido de carbono, lo cual indica una mayor cantidad de carbonato de calcio que evaluaré a continuación mediante las pérdidas de masa.



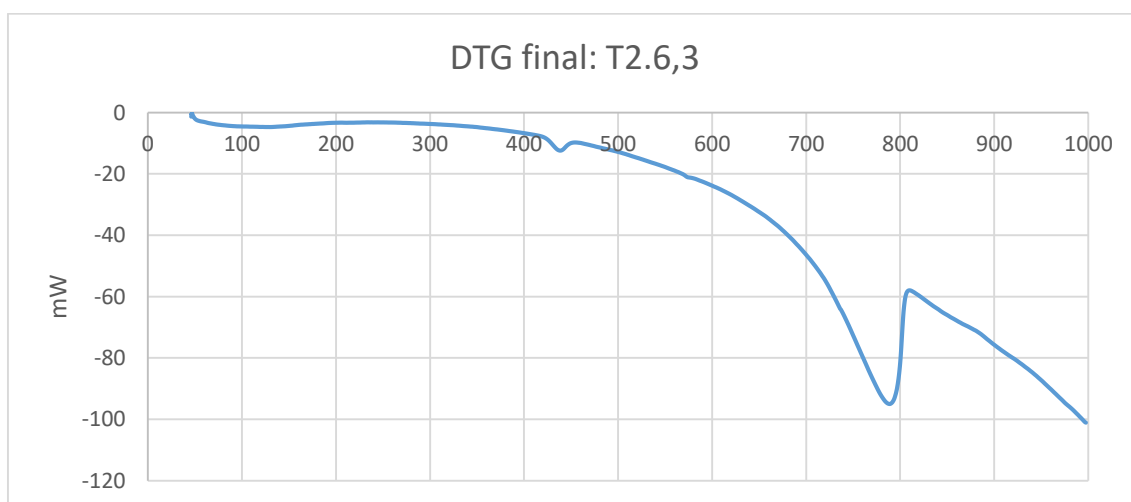
Gráfica 4.37 Curva termogravimétrica de la muestra T2.6,3 antes de ser expuesta al CO₂



Gráfica 4.38 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.6,3 antes de ser expuesta al CO₂



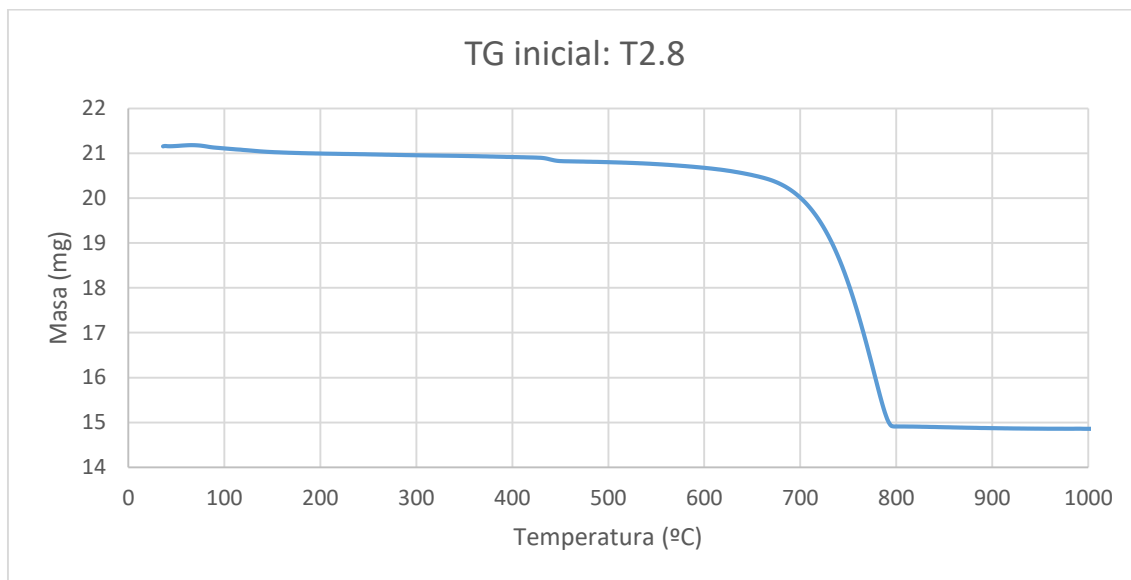
Gráfica 4.39 Curva termogravimétrica de la muestra T2.6,3 después de ser expuesta al CO_2



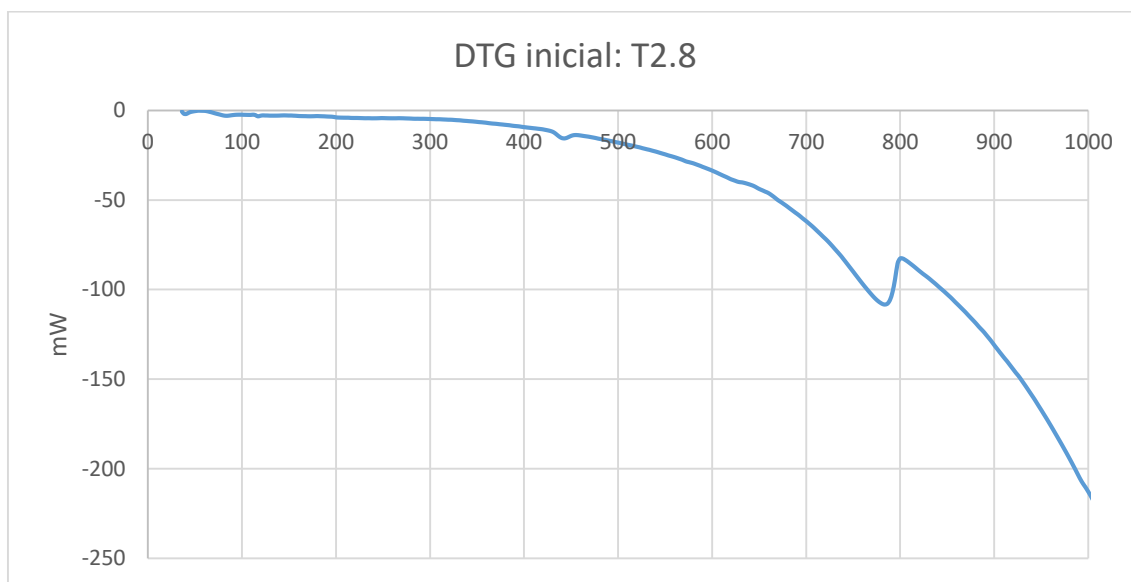
Gráfica 4.40 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.6,3 después de ser expuesta al CO_2

- Tipo 2.8

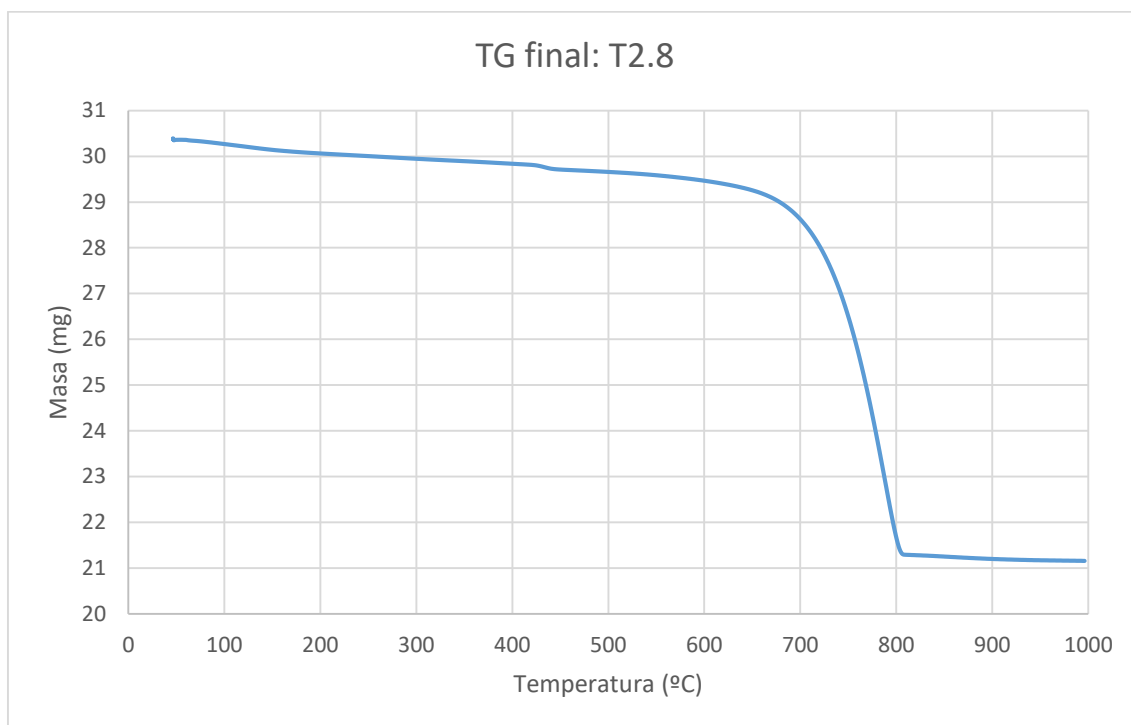
De los termogramas y curvas derivadas referentes al tipo T2.8 (Gráfica 4.21, Gráfica 4.22, Gráfica 4.23 y Gráfica 4.24) parece que no se ha producido ninguna alteración en la muestra durante la carbonatación, comparando los resultados numéricos referentes a las pérdidas de masa se evaluará a continuación su posible efecto sumidero de CO_2 .



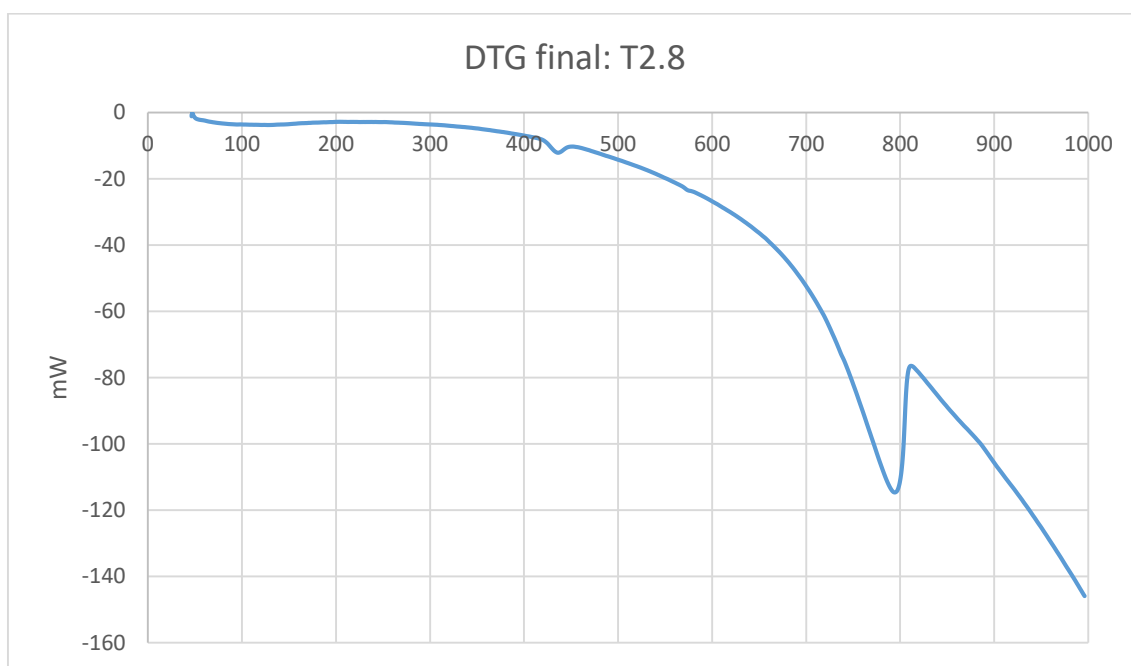
Gráfica 4.41 Curva termogravimétrica de la muestra T2.8 antes de ser expuesta al CO_2



Gráfica 4.42 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.8 antes de ser expuesta al CO_2



Gráfica 4.43 Curva termogravimétrica de la muestra T2.8 después de ser expuesta al CO_2



Gráfica 4.44 Derivada de la curva termogravimétrica de la muestra T2.8 después de ser expuesta al CO_2

Con los datos obtenidos en los escalones referentes a la deshidratación de la portlandita y evaporación del CO₂ del carbonato de calcio, se calcula el porcentaje de pérdida de masa en cada muestra, para así ser comparado entre antes y después de la exposición al CO₂. Según las tablas realizadas con los datos proporcionados por el análisis termogravimétrico, se calcula la cantidad de Portlandita y de carbonato de calcio que había en las distintas muestras según las cantidades de agua y dióxido de carbono evaporado, con las siguientes formulaciones se realizan los cálculos:

Portlandita:

- Descomposición a partir de los 440 °C
- $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
- Ca(OH)_2 : 74 g/mol
- CaO: 56.1 g/mol
- H₂O: 18 g/mol

Con la relación de moles y gramos, se puede afirmar que por cada 18 g de agua evaporada existen 74 g de portlandita, por lo que con las masas porcentuales se puede calcular el porcentaje en portlandita en cada muestra.

Carbonato de calcio

- Descomposición a partir de los 700 °C
- $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- CaCO_3 : 100.1 g/mol
- CaO: 56.1 g/mol
- CO₂: 44 g/mol

En relación al carbonato de calcio, por cada 44 g de dióxido de carbono existen 100 g de carbonato de calcio. En las siguientes tablas (Tabla 4.3, Tabla 4.4, Tabla 4.5 y Tabla 4.6) se presentan los resultados obtenidos de las pérdidas de masa debidas a la evaporación del agua y del dióxido de carbono de cada una de las muestras. Con la pérdida de masa se pueden calcular los moles de la reacción y así obtener la masa de portlandita y de calcita de cada una de las muestras. Sobre las pérdidas de masa en el intervalo 440-580°C de las granulometrías menores de 1 y también en el caso de la muestra de polvo de corte, los valores de portlandita no son estudiados, dado su finura no existe la posibilidad de contener cal hidratada.

	Masa a temperatura ambiental (mg)	Masa perdida 440- 550°C (mg)	Moles	Ca(OH)₂ (mg)	Ca(OH)₂ (%en masa)
T1.1	20,6600	0,1839	0,0102	0,7560	3,6594
T1.4	20,0940	0,1571	0,0087	0,6459	3,2142
T1.6,3	20,0039	0,1485	0,0082	0,6105	3,0519
T1.8	19,3101	0,1395	0,0077	0,5735	2,9699
T2.1	20,5086	0,2212	0,0123	0,9094	4,4341
T2.4	20,5828	0,1931	0,0107	0,7939	3,8569
T2.6,3	20,3697	0,1533	0,0085	0,6302	3,0940
T2.8	21,1583	0,1509	0,0084	0,6204	2,9320

Tabla 4.3 Pérdidas de agua y cálculo de portlandita antes de la carbonatación

	Masa a temperatura ambiental (mg)	Masa perdida 700-1000°C (mg)	Moles de CO ₂	CaCO ₃ (mg)	CaCO ₃ (% en masa)
PC	20,6511	5,6823	0,1291	12,9272	62,5983
T1.<1	20,0721	1,8849	0,0428	4,2881	21,3637
T1.1	20,6600	2,2332	0,0508	5,0805	24,5911
T1.4	20,0940	3,7065	0,0842	8,4323	41,9642
T1.6,3	20,0039	4,5128	0,1026	10,2666	51,3231
T1.8	19,3101	4,8430	0,1101	11,0178	57,0573
T2.<1	19,3163	1,1079	0,0252	2,5205	13,0484
T2.1	20,5086	2,7310	0,0621	6,2130	30,2947
T2.4	20,5828	3,6091	0,0820	8,2107	39,8911
T2.6,3	20,3697	4,0107	0,0912	9,1243	44,7937
T2.8	21,1583	5,1400	0,1168	11,6935	55,2667

Tabla 4.4 Pérdidas de CO₂ y cálculo del carbonato de calcio antes de la carbonatación

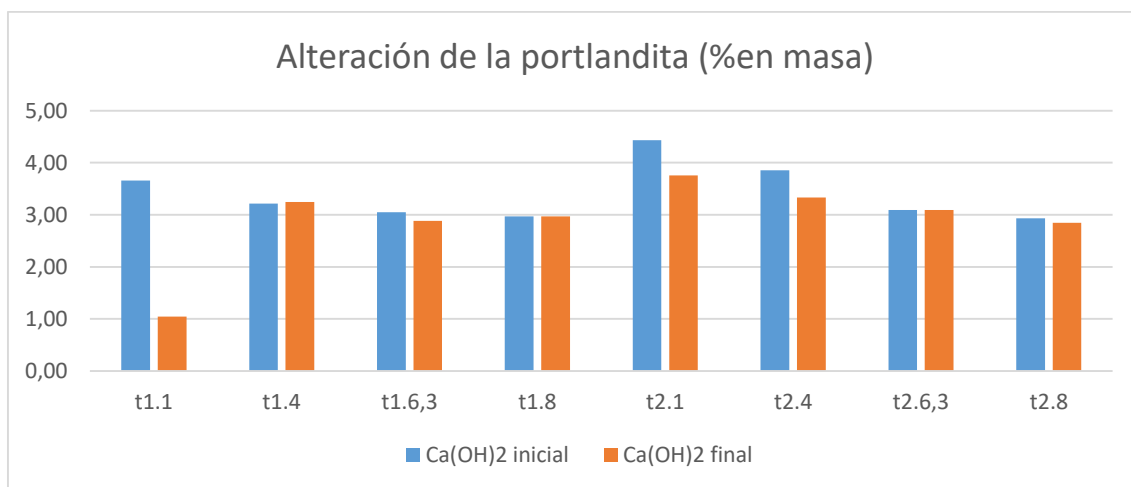
	Masa a temperatura ambiental (mg)	Masa perdida 440-550°C (mg)	Moles de H ₂ O	Ca(OH) ₂ (mg)	Ca(OH) ₂ (% en masa)
T1.1	30,5493	0,0775	0,0043	0,3186	1,0429
T1.4	30,5256	0,2410	0,0134	0,9908	3,2457
T1.6,3	29,6395	0,2079	0,0116	0,8547	2,8837
T1.8	31,3556	0,2481	0,0138	1,0200	3,2529
T2.1	32,4114	0,2960	0,0164	1,2169	3,7545
T2.4	31,0407	0,2517	0,0140	1,0348	3,3336
T2.6,3	32,7133	0,2570	0,0143	1,0566	3,2297
T2.8	30,3914	0,2106	0,0117	0,8658	2,8488

Tabla 4.5 Pérdidas de agua y cálculo de portlandita después de la carbonatación

	Masa a temperatura ambiental (mg)	Masa perdida 700-1000°C (mg)	Moles de CO ₂	CaCO ₃ (mg)	CaCO ₃ (% en masa)
PC	30,3880	11,8651	0,2697	26,9931	88,8282
T1.<1	29,0107	3,9139	0,0890	8,9041	30,6925
T1.1	30,5493	4,7398	0,1077	10,7830	35,2972
T1.4	30,5256	6,3594	0,1445	14,4676	47,3951
T1.6,3	29,6395	7,6479	0,1738	17,3990	58,7020
T1.8	31,3556	7,0464	0,1601	16,0306	51,1250
T2.<1	33,1286	4,5038	0,1024	10,2461	30,9284
T2.1	32,4114	5,0210	0,1141	11,4228	35,2431
T2.4	31,0407	7,0209	0,1596	15,9725	51,4568
T2.6,3	32,7133	7,3014	0,1659	16,6107	50,7765
T2.8	30,3914	7,4538	0,1694	16,9574	55,7967

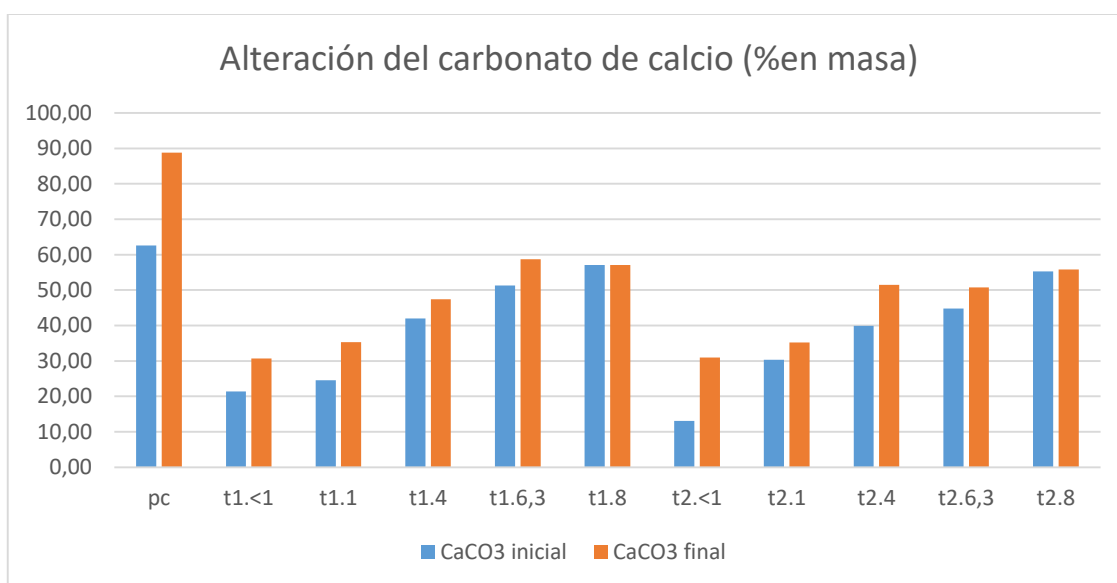
Tabla 4.6 Pérdidas de CO₂ y cálculo del carbonato de calcio después de la carbonatación

En la gráfica 4.45 se representan los porcentajes iniciales y finales de portlandita (Ca(OH)₂). En ambos casos están expresados en % en gramos de hormigón, para cada una de las distintas muestras estudiadas. Se observa una leve simetría de los porcentajes de portlandita (Ca(OH)₂). Destacar una mayor pérdida por posible precipitación de calcita en granulometrías menores. En el caso del tipo T1.1, es interesante analizar la proporción de portlandita que reacciona, con una posible reacción del 80% de ella, lo cual indica la carbonatación de gran parte de portlandita que contenía esta muestra ensayada. En los tipos menores de granulometría a 1 mm y en el caso del polvo de corte, al ser muestras de granulometría muy fina el óxido de calcio no se encuentra hidratado, por lo que no contendrá portlandita. Respecto las otras granulometrías no parece que la portlandita que contiene llegue a reaccionar ninguna fracción destacable. En conclusión, a menor granulometría (no menor a 1mm) la portlandita tiende a carbonatar más, si se compara con mayores granulometrías, esto aparentemente será debido a una mayor relación superficie de contacto con el CO₂ respecto su masa.



Gráfica 4.45 Gráfica comparativa de la portlandita inicial-final

En relación a las variaciones de las cantidades de carbonato de calcio, por la general, como era esperado, son mayores después de la carbonatación como se observar en la gráfica 4.46. Este aumento indica que diferentes fases del hormigón han carbonatado. Respecto a los valores obtenidos para la granulometría de 8 mm ha reducido la cantidad de carbonato y los valores de portlandita en el tipo 1 no han sido coherentes. Por eso, cabe advertir, que el proceso de elaboración de las muestras utilizadas en el estudio, a pesar de seguir detalladamente los pasos descritos en el capítulo 3, es susceptible de presentar variaciones. Estas variaciones pueden ser debidas a una diferente composición de la fracción retirada de la muestra, por lo que no parece ser representativa. En este sentido el análisis realizado de los resultados que se expone a asumir posibles discrepancias existentes con otros estudios y este trabajo se refiere únicamente a los datos obtenidos en los ensayos realizados en esta tesina.



Gráfica 4.46 Gráfica comparativa de carbonato de calcio inicial-final

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

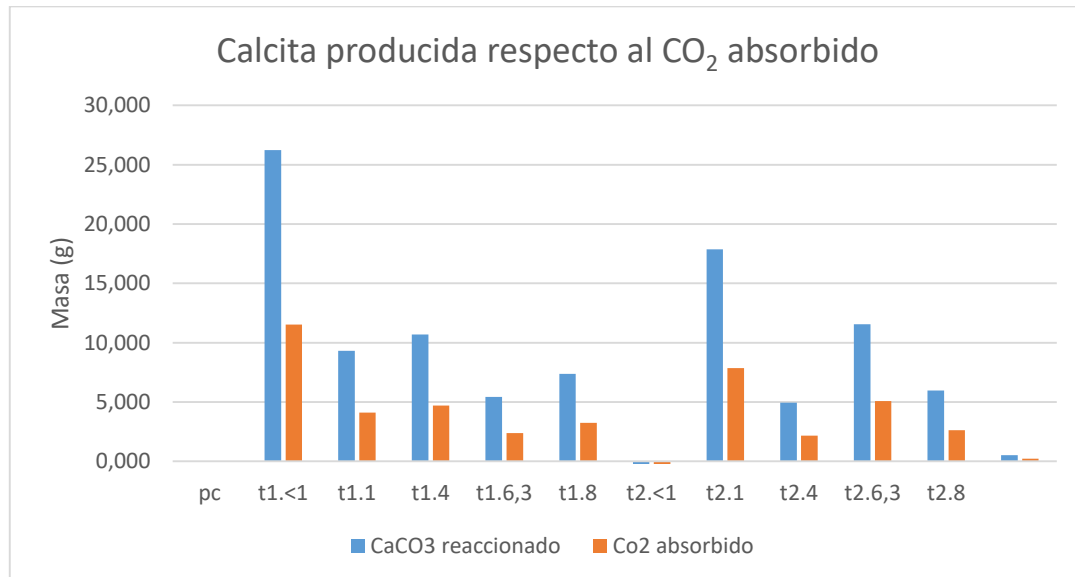
Una vez evaluados los resultados de caracterización de materia, falta corroborar una posible absorción de dióxido de carbono y encontrar la relación respecto la masa. En este apartado, se presentan los valores obtenidos para el cálculo del CO_2 absorbido. Para ello se ha buscado la diferencia de moles carbonatados antes y después de la permanencia en la autoclave, para así detectar los de nueva generación. De forma inversa a la calcita se ha aplicado para la cuantificación de la portlandita, con el fin de encontrar la cantidad de moles de portlandita que se estaban precipitando a carbonato de calcio y cuantificar así, cuantos moles de calcita provienen de la portlandita, con valores óptimos al tipo T1.1 que un 80% en masa de portlandita reacciona a calcita.

La parte restante a los moles de portlandita que precipitan a calcita, provienen de la reacción del dióxido de carbono con otras fases hidratadas como por ejemplo el CSH (silicato cálcico hidratado), que se detecta en granulometrías mayores a 1 mm en los termogramas por su pérdida de agua a partir de los 110 °C. Con la ayuda de los difractogramas se detecta la aparición de dolomita y ankerita debido a la carbonatación de otras fases hidratadas durante la exposición al CO_2 . Esto corrobora el aumento de carbonato de calcio a las muestras. Por lo que

se puede entender el porqué de los aumentos de calcita en las muestras finales, respecto a la portlandita que contiene inicialmente. Los siguientes valores calculados (Tabla 4.7) están referenciados a 100g de hormigón por muestra, con el fin de encontrar el porcentaje de CO₂ en masa absorbido por el hormigón.

Muestra	Calcita formada (moles)	Portlandita reaccionada (moles)	Otras fases hidratadas (moles)
PC	0,262	0,000	0,262
T1.<1	0,093	0,000	0,093
T1.1	0,107	0,036	0,071
T1.4	0,054	0,000	0,054
T1.6,3	0,074	0,002	0,071
T1.8	0,000	0,000	0,000
T2.<1	0,179	0,000	0,179
T2.1	0,049	0,010	0,040
T2.4	0,116	0,007	0,108
T2.6,3	0,060	0,000	0,060
T2.8	0,005	0,001	0,004

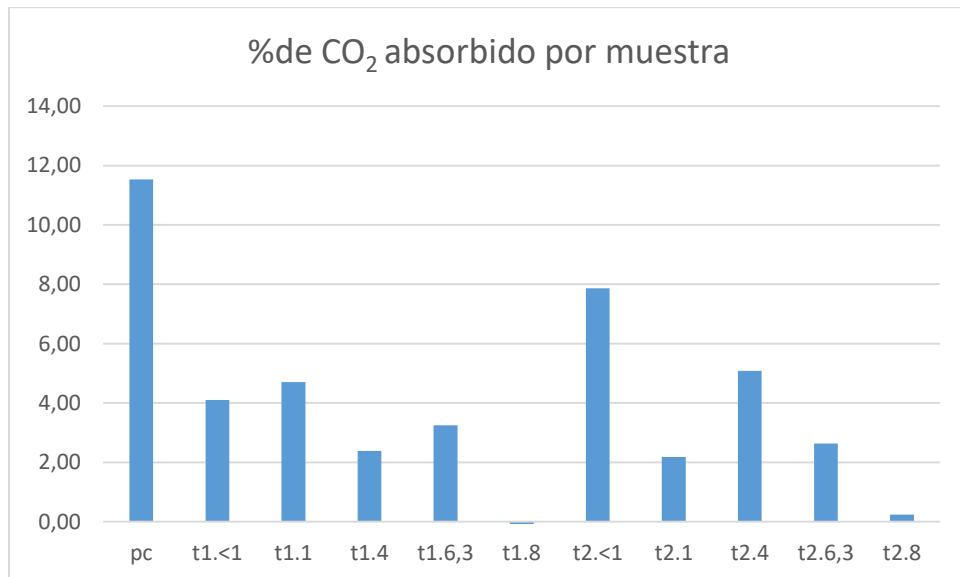
Tabla 4.7 Moles reaccionados de portlandita y otras fases hidratadas respecto los moles de calcita formados por 100g de muestra



Gráfica 4.47 Calcita producida respecto al CO₂ absorbido

Muestra	Moles	CO ₂ absorbido (g)
PC	0,262	11,530
T1.<1	0,093	4,101
T1.1	0,107	4,706
T1.4	0,054	2,387
T1.6,3	0,074	3,243
T1.8	0	0
T2.<1	0,179	7,859
T2.1	0,049	2,175
T2.4	0,116	5,084
T2.6,3	0,060	2,630
T2.8	0,005	0,233

Tabla 4.8 Absorciones de CO₂ por 100g de muestra



Gráfica 4.48 Porcentaje en masa de CO₂ absorbido

En los resultados obtenidos la tabla 4.8 se observa claramente que el material de menor granulometría tiende a absorber más cantidad que en las muestras de mayor medida. También resaltar el comportamiento de polvo de corte de hormigón, el cual duplica los valores de absorción del hormigón prefabricado (Gráfica 4.48). Respecto a las granulometrías de mayor tamaño, recordar que diversas fases quedan sin carbonatar en los difractogramas de las muestras de hormigón prefabricado con granulometrías 4, 6,3 y 8 mm, por ello, es lógica la reducción de los valores de absorción de CO₂ que se han experimentado.

Se puede extraer que, a mayor granulometría, los valores de absorción son menores. Esto puede ser debido a que, a mayor tamaño de grano, más dificultad de penetración tiene el dióxido de carbono en el material, respecto a granos más finos que tienen una mayor superficie de contacto exterior. A partir de los resultados calculados, se estimaría una absorción media de 110 g de dióxido de carbono capturado por 1 kg de muestra (Tabla 4.9), debido a la reacción de fases hidratadas que no han sido carbonatadas y el cemento que no reaccionó en el primer fraguado.

Muestra	Gramos absorbidos, por kilo de hormigón
PC	115,296
T1.<1	41,006
T1.1	47,060
T1.4	23,872
T1.6,3	32,435
T1.8	0,000
T2.<1	78,593
T2.1	21,751
T2.4	50,838
T2.6,3	26,298
T2.8	2,330

Tabla 4.9 Cantidades de absorción de CO₂ por kilo de hormigón

Los resultados obtenidos corroboran la hipótesis inicial de la posible utilización del hormigón residual como sumidero de dióxido de carbono, dándole así una segunda vida a un residuo no degradable que sería destinado a un vertedero. En granulometría menores a 1 mm los valores elevan su capacidad de absorción, su finura ayuda al CO₂ en reaccionar con fases que puedan carbonatar.

Debido a la complejidad del ensayo realizado en este trabajo para exponer las muestras de hormigón en contacto al CO₂, los valores obtenidos no son comparables a otros estudios que se hayan realizado hasta día de hoy. Otras investigaciones se han centrado en la capacidad de absorción de los elementos constructivos de edificios e infraestructuras, con el fin de evaluar las cantidades de dióxido de carbono que son absorbidas durante su vida útil. Un ejemplo de este último caso, sería el estudio realizado por los profesores Isabel Galán et al. de la Escuela de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid (Isabel Galan Garcia, et al, 2010), llegaron a obtener valores de absorción cercanos al 10 % en masa, con el mismo tipo de hormigón utilizado en el presente trabajo. Estos valores no son realmente representativos debido a que las muestras de hormigón utilizadas en el estudio de la profesora Galán fueron expuestas en condiciones normales en la calle, para así evaluar durante un año, las cantidades de CO₂ absorbidas debido a la carbonatación. Hay una gran cantidad de estudios relacionados con las capacidades de absorción del carbono mediante la carbonatación del hormigón, pero dirigidos a otras finalidades. La mayoría de estas investigaciones se centran en cantidades de CO₂ reaccionadas durante el fraguado de muestras de mortero, u otros se centran en cantidades de CO₂ absorbidas durante el fraguado de pastas, dentro de atmósferas controladas, con inyecciones variables de carbono para reproducir una carbonatación acelerada y distintas combinaciones de las humedades relativas.

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

2.1. CONCLUSIONES

El objetivo de principal de este trabajo ha sido encontrar una vía reductora del impacto ambiental producido por las emisiones de dióxido de carbono que se generan en la industria cementera.

Mediante una atmosfera controlada de CO₂, se ha reproducido una carbonatación acelerada de diferentes muestras de hormigón residual. Para la cuantificación del dióxido de carbono absorbido se han comparado las composiciones mineralógicas de las muestras inicialmente y después de la carbonatación acelerada.

El análisis termogravimétrico me ha permitido detectar las cantidades de calcita y portlandita que contenía cada muestra. Al conocer la cantidad de calcita, se ha podido cuantificar las cantidades de CO₂ que se han estado absorbiendo. Los valores de portlandita en granulometrías grandes no parece que hayan variado. Posiblemente, debido a una imposibilidad para el carbono de penetrar en el interior del grano, a causa de la saturación total de agua del material durante el ensayo.

Al mantenerse los valores de portlandita constantes sobre todo en las granulometrías mayores a 1mm, se ha recurrido a analizar las muestras iniciales y finales mediante el análisis de difracción de rayos X. El DRX ha permitido conocer otras fases hidratadas que estaban carbonatando, como la dolomita o la ankerita, las cuales no aparecían en las muestras iniciales.

Como conclusión final de este estudio, una vez realizada la campaña experimental y analizado los resultados, se comprueba que en granulometría menor a 1 mm, se puede llegar a obtener valores de absorción de dióxido de carbono del 11% respecto la masa del hormigón.

2.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto pretende incentivar el reciclaje del hormigón residual como sumidero de CO₂. A partir de los datos obtenidos, se derivan varias vías de investigación para lograr optimizar los valores de absorción de CO₂.

- Para evaluar la posibilidad de reciclar el filtro saturado de dióxido de carbono como agregado de hormigón o sustitutivo de parte del Clinker para la producción de cemento, sería necesario un estudio más exhaustivo de su caracterización química.
- En la campaña experimental de este trabajo solamente se han usado dos tipos de residuos, del cual solo se conocía el tipo de hormigón de una de las muestras dado que el polvo de corte provenía de distintos tipos de CEM. Por lo que, en una futura línea de investigación sería conveniente realizar ensayos con otros tipos de hormigones, para así comparar sus valores de absorción.
- Al conocer que a menor granulometría mayor absorción, si se quiere diseñar un filtro para chimeneas industriales, sería necesario incluir un análisis de la capacidad de fluir de los gases a través del filtro de material cementicio. Y, a la vez, tener presente la posibilidad de que otros gases emitidos reaccionaran con el hormigón, por lo que también sería necesario un análisis del efecto de los gases al filtro de hormigón.
- Para saber si la idea de estudio de este proyecto es realmente ecológica, sería conveniente analizar y comparar cuanto impacto se está generando para la preparación del filtro (transporte, energía, residuos de material, agua), respecto a las cantidades de dióxido de carbono que pueda captar.
- Finalmente, sería interesante probar de realizar un circuito para que pudiera fluir el CO₂ a través de los granos de hormigón, para así evaluar la capacidad de absorción respecto a los huecos entre los granos para que pasen los gases.

CAPÍTULO 6.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Ajdukiewicz, A. K. (2002). *Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. Cement and Concrete Composites*. Silesian University of Technology, Gliwice (Polonia)
- Barkera D.J., Turnera S.A., Napier-Moorea P.A, Clarkb M. y Davison J.E. (2009). *CO2 Capture in the Cement Industry. Greenhouse Gas Control Technologies 9, Proceedings of the 9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*. Conference Paper. (p. 87-94). Washington DC (USA).
- Belie, N. d. (2015). Fines extracted from recycled concrete as alternative raw material for Portland cement clinker production. *A Cement and Concrete Composites* (p. 70-80). Universidad de Gant (Bélgica).
- Deborah N.Huntzinger y Thomas D.Eatmonb. (2006). *A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan (USA).
- Emad Benhelala, Gholamreza Zahedia, Ezzatollah Shamsaeib y Alireza Bahadoric. (2013). *Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry*. (p. 142-161). J. Clean. Prod., 51.,
- Hendriks C.A., E. W. (2002). *Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry. Greenhouse gas control technologies*. Conference Paper. Kyoto (Japón).
- Erik K. Lauritzen (1997). *Producción de residuos de construcción y reciclaje*.
- Fisher, C. W. (2009). *EU as a Recycling Society*. Work Paper. Bruselas (Bélgica).

- Global Cement Report 10th edition . (2013). *An overview of global cement sector trends* . Lima (Perú).
- Iqbal Marie y Hisham Quiasrawi. (2012). *Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates*. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, The Hashemite University, Zarka, (Jordania).
- ISO/TC. (2005). *ISO/TC 71 Concrete, reinforced concrete and prestressed concrete*.
- Isabel Galán García, et al. (2010). *Estudio del efecto sumidero de CO₂ de los materiales de base cemento*. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid.
- Martin Schröder, F. M. (2017). *Unravelling exceptional acetylene and carbon dioxide adsorption within a tetra-amide functionalized metal-organic framework*. Nature Materials. Universidad de Manchester (Inglaterra)
- Natesan Mahasenan, S. S. (2003). The cement industry and global climate change: current and potential future cement industry CO₂ emissions. *6th International Conference on Greenhouses Gas Control Technologies* (p. 995-1000). Pacific Northwest National Laboratory, Battelle, Richland (USA).
- Nele de Belie, M. d. (2012). *The regeneration of cement out of Completely Recyclable Concrete: Clinker production evaluation* Universidad de Gant y Universidad de Krijgslaan (Bélgica).
- Norma UNE 1097-6:2001/A1:2006. *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*.
- Reyes, A. C. (2013). *Valoración de residuos de las industrias de acetileno y de centrales térmicas en materiales para su uso en ingeniería civil y arquitectura*. Trabajo final de master, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.
- Vicent Alcántara Escolano y Emilio Padilla Rosa. (2005). *Análisis de las emisiones de co₂ y sus factores explicativos en las diferentes áreas del mundo*. Revista de economía crítica, nº4, 2005 . (p. 17-37).

